

ESCOLA POLITÉCNICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

DANIELA GOVONI SOTELO

INVESTIGAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL ATRAVÉS DO MÉTODO GEOELÉTRICO DA RESISTIVIDADE

Porto Alegre 2019

PÓS-GRADUAÇÃO - STRICTO SENSU



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul



INVESTIGAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL ATRAVÉS DO MÉTODO GEOELÉTRICO DA RESISTIVIDADE

DANIELA GOVONI SOTELO

BACHAREL EM FÍSICA MÉDICA LICENCIADA EM FÍSICA MESTRA EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Porto Alegre

Agosto, 2019



INVESTIGAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL ATRAVÉS DO MÉTODO GEOELÉTRICO DA RESISTIVIDADE

DANIELA GOVONI SOTELO

BACHAREL EM FÍSICA MÉDICA LICENCIADA EM FÍSICA MESTRA EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

> ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Hugo Silvestrini CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Cássio Stein Moura

> > Tese realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Projeto "Mapeamento em Subsuperfície do Aquífero Guarani"

Porto Alegre Agosto, 2019

Ficha Catalográfica

S717i Sotelo, Daniela Govoni

Investigação de reservatórios de água subterrânea na região central do estado do Rio Grande do Sul através do método geoelétrico da resistividade / Daniela Govoni Sotelo . – 2019. 179.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Hugo Silvestrini. Co-orientador: Prof. Dr. Cássio Stein Moura.

1. seca. 2. águas subterrâneas. 3. método da resistividade elétrica. I. Silvestrini, Jorge Hugo. II. Moura, Cássio Stein. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a). Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul escola politécnica programa de pós-graduação em engenharia e tecnologia de materiais

INVESTIGAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL ATRAVÉS DO MÉTODO GEOELÉTRICO DA RESISTIVIDADE

CANDIDATA: DANIELA GOVONI SOTELO

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio/Grande do Sul.

DR. JORGE HUGO SILVESTRINI - ORIENTADOR

DR. CÁSSIO STEIN MOURA - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

DR. PEDRO ANTÔNIO ROEHE REGINATO - DO IPH - UFRGS

DR. JULIANO D'ORNELAS BENFICA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PUCRS

DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - PGETEMA - PUCRS



Campus Central Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 505 - CEP: 90619-900 Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625 E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br www.pucrs.br/politecnica

"Nunca é alto o preço a se pagar pelo privilégio de pertencer a si mesmo."

(Friedrich Nietzsche)

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Sergio Sotelo (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jorge Hugo Silvestrini, por aceitar ser meu orientador na reta final desse trabalho, por ouvir pacientemente meus questionamentos, pelo forte espírito humano e experiência, que o fazem um professor empático e compreensivo, sem abrir mão da qualidade do trabalho científico.

Ao Professor Cássio Stein Moura, meu co-orientador, por me conceder a oportunidade de integrar o GIGA (Grupo Interdisciplinar de Geofísica Aplicada) e fazer parte do grande projeto de "Mapeamento em Subsuperfície do Aquífero Guarani", por coordenar nossa pesquisa e auxiliar no planejamento das atividades de campo, pelo acompanhamento e apoio do início ao fim da trajetória do doutorado, pela compreensão e amizade.

Aos membros da banca de qualificação, Prof. Dr. Pedro Reginato, Prof. Dr. Juliano Benfica e Prof. Dr. Jairo Andrade, que com sua experiência e conhecimento deram uma contribuição de extrema relevância para a construção dessa tese.

Aos colegas de doutorado Gabriela Borges Soares, Giovanna Ramos Garcez e Júlio Cesar Gall Pires, pela amizade, pelos momentos de descontração, pela oportunidade de aprendermos juntos, pelo companheirismo constante e por remarem comigo nesse mesmo barco.

Às pós-doutoras do GIGA, Juliane Marcolino, Vanessa Osório e Heldiane dos Santos, por oferecem incansavelmente sua amizade e sua experiência em prol do desenvolvimento desse trabalho.

Ao colega do IPR, geólogo Adolpho Herbert Augustin, por compartilhar seu conhecimento teórico e prático, e principalmente por espalhar motivação e bom humor em momentos complicados.

Aos alunos do curso de geofísica da PUCRS que participaram das saídas de campo, em especial ao aluno Tales Ferraz de Paula, bolsista de iniciação científica do grupo, pelo auxílio e esforço que empreendeu em suas tarefas. Ao LASET (Laboratório de Simulação de Escoamentos Turbulentos), especialemente aos colegas Filipe Damasceno Vianna e Bruno Farenzena pelo apoio técnico-científico, e à colega Karina Ruschel pela sensibilidade.

Ao professor Eduardo Cassel, coordenador do PGETEMA, pela abertura ao diálogo que concede a nós alunos e pela prontidão em buscar soluções de maneira colaborativa.

À minha irmã Eniale Govoni Sotelo pela parceria e amor eternos, por me ajudar a estabelecer desde cedo um laço de carinho com o conhecimento.

À minha mãe Elaine Govoni Sotelo, pelo exemplo de força, fé e perseverança; por nunca medir esforços para atender minhas necessidades e me oportunizar o melhor possível; pelo amor incondicional.

Ao meu namorado João Paulo Loureiro Pardelhas, pelo carinho, paciência e dedicação, por me convencer de que tudo daria, e tudo sempre vai dar certo, por alegrar meus dias e me fazer sorrir sempre.

Ao meu pai, por sempre colocar meus estudos em primeiro lugar, por me apoiar nas minhas decisões, por ter sido meu amigo durante toda a sua vida.

Ao IPR (Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais) pelo empréstimo de materiais e pela concessão do espaço físico utilizado como laboratórios e ambiente de estudos.

À CAPES e à PUCRS, pelas bolsas de estudos que permitiram minha permanência no programa de pós-graduação. "O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.091736/2014-01".

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	7
AGRADECIMENTOS	8
SUMÁRIO 1	0
LISTA DE FIGURAS 1	12
LISTA DE TABELAS 1	9
LISTA DE SÍMBOLOS	21
RESUMO	22
ABSTRACT	23
1. INTRODUÇÃO 2	24
2. OBJETIVoS	29
2.1. Objetivo Geral	29
2.2. Objetivos Específicos	29
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3	31
3.1. Águas Subterrâneas	31
3.1.1. Ciclo hidrológico e a origem das águas subterrâneas	32
3.1.2. Classificação dos aquíferos	33
3.1.3. Sistema Aquífero Guarani	38
3.1.3.1. Compartimentação estrutural e unidades hidroestratigráficas	39
3.2. O método da eletrorresistividade	44
3.2.1. Princípios físicos da resistividade elétrica	45
3.2.2. Relação entre resistividade elétrica e litologia	45
3.2.3. Fluxo de corrente em subsuperfície	48
3.2.4. Arranjos dos eletrodos e fator geométrico	50
3.2.5. Profundidade de investigação	60
3.2.6. O método da eletrorresistividade na investigação de águas subterrâneas	61
4. MATERIAIS E MÉTODOS 6	39
4.1. Delimitação da área de interesse	70
4.2. Análise de dados de poços e georreferenciamento	71

4.3. Descrição do aparato experimental	73
4.4. Aquisição de dados de resistividade elétrica	77
4.5. Processamento e inversão dos dados adquiridos em campo	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1. Procedimento operacional alternativo para aquisição de dados	89
5.2. Linhas de investigação	96
5.2.1. Observações sobre a profundidade de investigação (DOI) alcançada.	102
5.2.2. Desvio padrão das medidas adquiridas	106
5.3. Dados hidrogeológicos dos pontos estudados	108
5.4. Descrição comparativa dos perfis elétricos com dados de poços	112
5.4.1. Município de Santa Cruz do Sul (Abril/2017)	113
5.4.2. Região da Quarta Colônia (Setembro/2017)	120
5.4.3. Município de Alegrete (Abril/2018)	131
5.4.4. Município de Candelária (Julho/2018)	145
5.5. Conformidade entre o perfil elétrico e dados litológicos dos poços	157
6. CONCLUSÕES	.161
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	.164
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.165

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1 Esquema representativo das diferentes fases envolvidas no ciclo hidrológico [24]......32
- Figura 3.3 Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha. Adaptado de [27]......35
- Figura 3.4 Modelo clássico de uma situação de confinamento de um aquífero, entre um embasamento na parte inferior e um aquífero livre no topo [26].....37
- Figura 3.5 Mapa mostrando a área de abrangência do Sistema Aquífero Guarani. Estão diferenciadas as zonas de afloramento e de confinamento. Adaptado de [26]......39
- Figura 3.6. Compartimentação estrutural do Sistema Aquífero Guarani para o Rio Grande do Sul, mostrando também a hidroestratigrafia. Adaptado de [32]......40
- Figura 3.7. Mapa das unidades hidrolitológicas do SAG no Rio Grande do Sul. Adaptado de [32].....42
- Figura 3.8 Faixas de resistividade e condutividade relacionada à litologia de diferentes rochas. Adaptado de [39, 40].47
- Figura 3.9 Representação do fluxo de corrente e das superfícies equipotenciais devido à passagem de corrente elétrica através dos eletrodos A e B, considerando-se um meio homogêneo [43]......49
- Figura 3.11 Configuração tetraédrica usual de campo [23].51
- Figura 3.12 Esquema de aquisição de dados de resistividade elétrica utilizando-se o arranjo dipolo-dipolo [23]......54

Figura 3.13 Esquema de montagem no arranjo Wenner, com espaçamento entre os eletrodos mantido constante. Adaptado de [38]......58

Figura 3.14 Esquema de montagem no arranjo Schlumberger. Adaptado de [38]...59

- Figura 4.2 Mapa do Rio Grande do Sul, onde está demarcada a região da Quarta Colônia e os municípios de Santa Cruz do Sul, Candelária e Alegrete, locais onde foram realizados os levantamentos geofísicos.......71
- Figura 4.4. Aparato experimental em uma situação real de campo, mostrando o eletrorresistivímetro, fios de cobre conectados aos eletrodos, a operadora do equipamento e um poço próximo à linha de investigação.76
- Figura 4.6. Planilha eletrônica onde são registrados os dados coletados em campo e feitos os cálculos necessários para a construção do perfil elétrico......81
- Figura 4.8. Arquivo eletrônico de extensão .dat, requisito para inversão dos dados geoelétricos adquiridos em campo, através o *software* Res2Dinv.......84

- Figura 4.10. Fragmento do arquivo de extensão .inv (gerado pelo software Res2Dinv) correspondente à iteração 3, necessário para refazer o imageamento com escala de cores padronizada no software Surfer....87

- Figura 5.2. Comparação pictórica entre o procedimento operacional tradicional e o alternativo, empregados na aquisição de dados de eletrorresistividade em campo......92
- Figura 5.3 Exemplo da primeira página de uma tabela de campo para aquisição de dados de resistividade elétrica......94
- Figura 5.4 Exemplo da segunda página da nova tabela de campo para aquisição de dados de resistividade elétrica, mostrando a posição de cada cabo nos eletrodos A, B, M e N......95

- Figura 5.14. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação da Região da Quarta Colônia. Adaptado de [81].109
- Figura 5.15. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação no município de Alegrete. Adaptado de [81]....110
- Figura 5.16. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação no município de Candelária. Adaptado de [81].110
- Figura 5.17 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha SC1 e do poço 4300023674......114
- Figura 5.18 Imageamento geoelétrico da Linha SC1, localizada no município de Santa Cruz do Sul, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023674......115
- Figura 5.20 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha SC2 e do poço 4300023609......116
- Figura 5.21 Imageamento geoelétrico da Linha SC2, localizada no município de Santa Cruz do Sul, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023609......117
- Figura 5.22 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha SC3 e de poços próximos. A seta indica a direção e o sentido do poço 4300023616, que se encontra a cerca de 2,4 km de distância da linha de investigação. 118

Figura 5.23 Imageamento geoelétrico da Linha SC3, localizada no município de Santa Cruz do Sul, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023616......119

Figura 5.24 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC1 e do poço 4300021299......120

Figura 5.26 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC2......122

Figura 5.31 Imageamento geoelétrico da Linha QC4, localizada no município de Faxinal do Soturno/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023461......126

Figura 5.32 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC5 e do poço 4300002705......127

Figura 5.35 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL1 e do poço 4300026139......131

 Figura 5.47 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL6, próxima ao poço 4300001355......142

Figura 5.48 Imageamento geoelétrico da Linha AL6, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300001355......143

Figura 5.49 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD1a e CD1b e do poço 4300006306.145

- Figura 5.51 Imageamento geoelétrico da Linha CD1b, perpendicular à linha CD1a, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolodipolo, com dados do poço 4300006306......147
- Figura 5.53 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD2 e do poço 4300006308......148
- Figura 5.55 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD3 e do poço 4300006317......150
- Figura 5.57 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD4 e do poço 4300006327......152
- Figura 5.59 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD5 e do poço 4300006321......153
- Figura 5.60 Imageamento geoelétrico da Linha CD5, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006306......154

LISTA DE TABELAS

- Tabela 3.1. Comparação do desempenho dos principais arranjos de eletrodos, considerando diferentes parâmetros [19, 20, 22, 43, 46]......53
- Tabela 3.2. Profundidade de investigação estimada para os arranjos dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger, de acordo com três estudos diferentes.61

- Tabela 5.5. Unidade Hidrolitológica e Unidade Hidroestratigráfica a qual pertence

 cada linha de investigação

 111

- Tabela 5.8. Dados comparativos entre os valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço e os valores de resistividade elétricas medidos, de acordo com a variação de profundidade, considerando as linhas de investigação da Região da Quarta Colônia.130

- Tabela 5.11. Grupos nos quais foram distribuídas as linhas de investigação, de acordo com a conformidade dos perfis elétricos com os perfis litológicos.157

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Resistência elétrica	Ω
ρ	Resistividade elétrica	Ω.m
<i>ρ</i> (a)	Resistividade elétrica aparente	Ω.m
i	Corrente elétrica	А
С	Comprimento de um condutor	m
St	Área transversal de um condutor	m²
S _{se}	Área de uma semi-esfera	m ²
A	Primeiro eletrodo de corrente	-
В	Segundo eletrodo de corrente	-
М	Primeiro eletrodo de potencial	-
N	Segundo eletrodo de potencial	-
k	Fator geométrico	-
а	Espaçamento unitário entre os eletrodos	m
L	Comprimento da linha de investigação	m
n	Nível de investigação	1,2,3
mp	mid-point	m
J	Densidade de corrente	A/m ²
E	Campo elétrico	V/m
С	Constante de proporcionalidade	-
DOI	Profundidade de investigação	m
Q	Vazão	m ³ /h
Q/s	Vazão específica	m³/h/m
Т	Transmissividade	m²/s
К	Condutividade hidráulica	m/s
SP	Potencial espontâneo	V
DLP	Distância linha-poço	m
np	Número de pontos medidos	1,2,3

RESUMO

SOTELO, Daniela Govoni. Investigação de reservatórios de água subterrênea na região central do estado do Rio Grande do Sul através do método geoelétrico da resistividade. Porto Alegre. 2019. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O estado do Rio Grande do Sul (RS) tem sua economia baseada na agropecuária, que é fortemente dependente da disponibilidade hídrica. Porém, tem enfrentado estiagens prolongadas, e uma solução atual para mitigação de secas é a prospecção de água subterrânea. O método geofísico da eletrorresistividade (ER) tem sido aplicado no Brasil e no mundo para essa finalidade, pois permite a identificação de diferentes litologias encontradas em subsuperfície de acordo com suas propriedades elétricas, sem a necessidade de escavações. O método geofísico da resistividade elétrica foi empregado para o estudo de camadas litológicas na zona de recarga do Sistema Aquífero Guarani. Foram executados levantamentos geoelétricos em 21 linhas de investigação, com comprimento entre 50 e 125 metros. O método foi otimizado de modo a diminuir o tempo de aquisição dos dados. Os dados coletados em campo (medidas de corrente elétrica e diferença de potencial) foram processados e invertidos com os softwares Res2Dinv[®], gerando perfis elétricos 2D, que foram relacionados com perfis litológicos de poços tubulares, com dados obtidos a partir da técnica de sísmica de refração e com dados hidrogeológicos. Considerou-se também a distância entre a linha e o poço. O desvio padrão das medidas de corrente elétrica ficou entre 0 e 10,41 mA, e entre 0,08 e 10,53 mV para diferença de potencial. A maioria dos perfis elétricos (12) apresentou elevada compatibilidade com os dados de poços, 5 apresentaram compatibilidade razoável e em 4 deles a análise não pode ser completa. Algumas linhas de investigação estão localizadas na borda entre o aquífero granular e o fraturado, o que pode explicar inconformidades entre perfis litológicos e elétricos. A profundidade de investigação ficou entre 13 e 21 m, dentro dos valores esperados de acordo com modelos teóricos. Através dos perfis elétricos, foram identificadas estruturas geológicas com potencial de armazenamento de águas subterrâneas pela presença de fraturamentos e pela estimativa do grau de saturação da rocha.

Palavras-Chave: método da resistividade elétrica, águas subterrâneas, seca.

ABSTRACT

SOTELO, Daniela Govoni. Investigation of groundwater reservoirs in the central region of Rio Grande do Sul state through the geoelectric resistivity method. Porto Alegre. 2019. PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The state of Rio Grande do Sul (RS) has its economy based on agriculture and livestock, which are strongly dependent on water offer. However, RS have been suffering prolonged droughts, and a current solution to mitigate this problem is the underground water prospection. The geophysical method of electrical resistivity has been applied in Brazil and worldwide for this purpose, since it allows the identification of different lithologies found in subsurface according to electrical properties of the materials, with no need of excavations. The geophysical method of electrical resistivity was used to study lithological layers in the Guarani Aquifer System recharge zone. Geoelectric surveys were carried out in 21 research lines, with a length between 50 and 125 meters. The method has been optimized to reduce data acquisition time. The data collected in the field (electrical current and voltage measurements) were processed and inverted with Res2Dinv® software, generating 2D electric profiles, which were compared with tubular wells lithological profiles, with data obtained from the refraction seismic technique and with hydrogeological data. The distance between the line and the well was also considered. The standard deviation of the electric current measurements was between 0 and 10.41 mA, and between 0.08 and 10.53 mV for voltage. Most of the electric profiles (12) presented high compatibility with the well data, 5 presented reasonable compatibility and in 4 of them the analysis could not be complete. Some lines of investigation are located at the edge between the granular and fractured aquifers, which may explain nonconformities between lithological and electrical profiles. The depth of investigation was between 13 and 21 m, within the expected values according to theoretical models. Through the electrical profiles, geological structures with potential for groundwater storage were identified by the presence of fractures and the estimation of the degree of saturation of the rock.

Key-words: DC resistivity method, groundwater, drought.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (World Water Development Report – WWDR4) [1], as mudanças climáticas e o crescimento cada vez mais acelerado da demanda por água exercem forte pressão sobre os recursos hídricos disponíveis no mundo. Em estudos ambientais focados na gestão desses recursos, é importante apresentar o conceito de pegada hídrica, que pode ser definida como o volume de água total usado durante a produção e consumo de bens e serviços, incluindo o consumo direto e indireto no processo de produção, ou seja, é uma medida da apropriação humana da água do planeta [2].

Um dado importante revela que a produção agrícola é responsável por 92% da pegada hídrica global e que até o ano de 2050, o acréscimo da necessidade de alimentos no mundo deverá crescer cerca de 70%, salientando que as estimativas mais otimistas de consumo mundial de água para a agricultura mostram um acréscimo de cerca de 19% para esse período [1].

Acredita-se que a quantidade de água existente no globo terrestre é suficiente para atender toda a população. Porém, a distribuição não-uniforme dos recursos hídricos, bem como a distribuição irregular dos conglomerados humanos e do desenvolvimento econômico no planeta, contribuem para a dificuldade de levar água a todos [2, 4]. As áreas urbanizadas são aquelas que demandam maior volume de água e estima-se que entre 2009 e 2050 a população urbana mundial deverá crescer, de 54% para 66%. Assim, a estimativa para 2050 é de que 54 países estarão enfrentando estiagens severas. O consumo mundial de energia também deverá aumentar, e todas as fontes de energia elétrica necessitam de água em seus processos produtivos [1, 5].

A agricultura, a produção de energia, a indústria e o consumo humano são atividades que demandam uso intensivo da água de uma maneira geral no mundo. O Brasil não deixa de seguir esse padrão. No país, a maior demanda de água (63%) é proveniente da agricultura, principalmente por conta das atividades de irrigação. Em seguida, aparece a demanda destinada ao uso doméstico, que representa 18% do total; da indústria, que representa 14%, e da dessedentação animal, com 5% [6].

No Rio Grande do Sul a situação é alarmante. Há décadas, o estado enfrenta estiagens prolongadas. Episódios severos de seca no RS ocorreram nos anos de 2004, 2005 e 2009, afetando, respectivamente, 422, 396 e 246 municípios gaúchos [7]. Em 2012, foram contabilizados 145 municípios do RS em estado de emergência devido à estiagem, que foi considerada a maior dos últimos 60 anos [8]. De acordo com dados do Centro Estadual de Meteorologia (CEMET), nesse ano registrou-se um decréscimo acentuado, de cerca de 380 mm, na precipitação pluviométrica ocorrida durante o mês de fevereiro no território rio-grandense, em relação à média histórica (de 1961 a 2000) da precipitação pluviométrica normal, em mm, para o mesmo mês [9].

O estado do Rio Grande do Sul tem sua economia baseada na atividade agropecuária, que é diretamente dependente do ciclo das chuvas. As indústrias que se dedicam ao beneficiamento da produção agropecuária também necessitam de grandes volumes de água. Estimativas da pegada hídrica para a produção de alguns bens industriais e alimentos largamente consumidos no mundo apontam que para produzir, por exemplo, 1 kg de arroz, são necessários em torno de 2.000 litros de água; para produzir 1 m² de couro, utiliza-se de 20 a 440 litros de água. Já a criação de um boi envolve o gasto de cerca de 100.000 litros de água [5].

Dessa maneira, alterações no padrão pluviométrico causam prejuízos aos produtores. A arrecadação estadual também fica prejudicada com a diminuição da produção, resultando no empobrecimento da população e do estado. Somente em janeiro de 2012, o governo estadual estimou que a seca que então atingia o RS já teria provocado um prejuízo de 2,2 bilhões de reais [10].

Entre os anos de 1995 a 2014, os prejuízos totais devido a desastres naturais no Brasil chegaram a cerca de 137 bilhões de reais, considerando os danos materiais tanto no setor público quando no setor privado. Desse total, cerca de 22 bilhões foram contabilizados no Rio Grande do Sul, que ocupa a primeira posição entre os estados brasileiros que sofreram tais danos. Se forem analisados somente os prejuízos do setor privado na agricultura no mesmo período, novamente o estado do Rio Grande do Sul fica em destaque, sendo responsável por cerca de metade do prejuízo registrado na Região Sul (RS, SC e PR), que chega a 33,7 bilhões de reais. Quanto aos prejuízos relacionados ao setor privado da pecuária, o Rio Grande do Sul ocupa o terceiro lugar entre os estados brasileiros que sofreram mais danos materiais (3,3 bilhões de reais), ficando atrás apenas da Bahia (3,6 bilhões de reais) e de Minas Gerais (4,4 bilhões de reais) [11].

Deve-se destacar que a água doce representa apenas cerca de 2,5% dos recursos hídricos disponíveis no planeta Terra, uma vez que o restante é salgada, e está distribuída por mares, oceanos, lagos salgados e aquíferos salinos [12]. Além disso, somente uma pequena parcela de água doce (0,3%) pode ser encontrada em fontes superficiais de acesso fácil, como rios e lagos. Cabe considerar ainda que muitos desses mananciais já se encontram esgotados ou apresentam elevado grau de contaminação. Solos e pântanos acumulam cerca de 0,9% da água doce. O volume mais abundante (68,9%) está presente em geleiras e na neve, dificultando sua captação e uso. Tais problemas trazem como consequência o uso cada vez mais amplo de águas subterrâneas [13], que apesar de estarem armazenadas em poros e fissuras de rochas, representam quase 30% da água doce disponível no mundo [4].

Diante da escassez hídrica, da saturação dos mananciais superficiais e do aumento vertiginoso da demanda por água, o estudo de recursos hídricos encontrados em subsuperfície e sua consequente prospecção se torna uma alternativa viável para auxiliar na mitigação do problema da seca. A oferta abundante de águas subterrâneas já é considerada fundamental para o suprimento doméstico, manutenção da vida e garantia da segurança energética e alimentar de grande parte da população mundial [14]. Desse modo, são entendidas como um recurso estratégico, com destacada relevância ambiental, econômica e social. Praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou em processo de desenvolvimento, utilizam água subterrânea para atender às suas necessidades [1, 15].

É possível que as águas encontradas em subsuperfície apresentem algumas vantagens em relação às águas superficiais, de rios e lagos. Durante a percolação, podem ser filtradas e purificadas de maneira natural, conferindo ótima qualidade e dispensando tratamentos; são menos influenciadas por variações climáticas; é possível extraí-las perto do local de uso; apresentam temperatura constante; existem em quantidades consideráveis em suas reservas; e, em geral, estão mais protegidas contra poluição e contaminação [16, 17].

Apesar das vantagens citadas em relação às águas superficiais, a explotação adequada de água subterrânea está condicionada a diversos fatores quantitativos, qualitativos e econômicos [15, 16]. Encontra alguns obstáculos, devido, por exemplo, à sua ocorrência em grandes profundidades. Depende ainda de uma avaliação das condições geográficas, geológicas e hidrológicas onde a água se encontra, pois nem todas oferecem as características necessárias à captação da água em vazões médias e grandes [14]. Embora a água subterrânea esteja protegida do impacto direto, o clima pode gerar uma influência indireta, na redução da recarga, ou ainda impactando na qualidade da água. Existe uma parcela renovável da água subterrânea diretamente ligada a processos hidrológicos próximos à superfície, que pode ser diretamente impactada por mudanças climáticas. Por outro lado, há uma parte não renovável, encontrada em depósitos profundos, armazenadas há muito tempo, que possuem pouca ligação com o clima [18].

O Brasil e os países que fazem limite com a Região Sul (Argentina, Uruguai e Paraguai) possuem em seu subsolo um vasto reservatório de água denominado Sistema Aquífero Guarani (SAG), que ocupa também grande parte do território do estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, é fundamental avançar nos conhecimentos sobre os sistemas aquíferos e suas litologias, que definem seu potencial de armazenamento hídrico. Informações de qualidade, junto com políticas funcionais de gestão de recursos hídricos, contribuem de maneira significativa para a expansão das redes de captação de águas depositadas em subsuperfície.

Foi no ano de 1912 que Conrad Schlumberger apresentou a ideia de empregar medidas de resistividade elétrica para estudar litologias encontradas em subsuperfície. A técnica foi primeiramente utilizada na prospecção de petróleo [19] e atualmente mais da metade dos casos de estudos geofísicos de águas subterrâneas aproveitam métodos elétricos [20], os quais são capazes de identificar diferentes materiais geológicos a partir das suas propriedades elétricas intrínsecas [21, 22]. O método da eletrorresistividade apresenta como principal vantagem o fato de não ser destrutivo nem invasivo. Assim, não afeta a estrutura ou o funcionamento dos solos e ainda minimiza escavações ou perfurações físicas, que requisitam mais tempo, custos elevados e ainda deixam portas abertas para contaminantes [19, 23].

O método da resistividade elétrica é amplamente utilizado no estudo de águas subterrâneas no Brasil e no mundo. Diante dos prejuízos da seca no estado do RS e do espaço para ampliação dos conhecimentos sobre os reservatórios subterrâneos existentes, que consistem não somente em uma alternativa para o problema da escassez hídrica, mas em uma questão científica instigante, propõe-se a investigação das estruturas litológicas com potencial de armazenamento de água subterrânea, através do método da resistividade elétrica. Assim, a presente pesquisa justifica-se por orientar um progresso importante na garantia da segurança hídrica do estado, que é afetado pela escassez de água nas esferas social, econômica e ambiental. Dentro dessa conjuntura, a geofísica lança-se como componente crucial para o desempenho desse trabalho tão essencial quanto desafiador.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar variações na litologia subterrânea em terrenos localizados dentro da zona de recarga do Sistema Aquífero Guarani no estado do Rio Grande do Sul, utilizando o método geofísico da eletrorresistividade.

2.2. Objetivos Específicos

- Obter perfis elétricos das linhas de investigação através do método da eletrorresistividade;

- Diminuir o tempo necessário para aquisição dos dados em campo, através da otimização do procedimento operacional do resistivímetro elétrico;

- Identificar, nos perfis elétricos obtidos, a presença de fraturamentos ou falhas que indiquem a possibilidade de armazenamento de água;

 Estimar a litologia das camadas presentes em subsuperfície e o grau de saturação dessas rochas, por meio dos perfis elétricos e da comparação dos mesmos com perfis litológicos de poços;

- Estabelecer uma relação entre os perfis elétricos e as Unidades Hidroestratigáficas na qual estão inseridos, colaborando para a interpretação dos dados geofísicos; - Correlacionar os perfis elétricos obtidos com perfis adquiridos a partir da técnica de sísmica de refração, a fim de complementar as informações da subsuperfície do terreno;

- Contribuir para o avanço no conhecimento das litologias capazes de armazenar água e garantir a segurança hídrica do estado, colocando a geofísica como componente crucial para o desempenho desse trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, procurar-se-á mostrar a origem das águas subterrâneas dentro do ciclo hidrológico. Serão apresentadas algumas definições sobre os aquíferos e suas classificações de acordo com a porosidade das estruturas em subsuperfície e com a pressão sofrida pela água armazenada, elucidando o conceito de zona de recarga e descarga.

Dados sobre a distribuição e demanda de água na superfície terrestre e no Brasil serão exibidos, apresentando-se brevemente o impacto da grave crise hídrica que assola o planeta. Especial atenção será dada à ocorrência de estiagens no estado do Rio Grande do Sul. As águas subterrâneas serão abordadas como alternativa viável para a mitigação do problema da seca no estado.

O método geofísico da resistividade elétrica será estudado como técnica de prospecção de recursos hídricos encontrados em subsuperfície. Serão abordados os princípios físicos da resistividade elétrica e a propagação de corrente elétrica através das camadas encontradas em subsuperfície. Por fim, exemplos da aplicação do método no estudo de águas subterrâneas no RS, no Brasil e no mundo serão apresentados.

3.1. Águas Subterrâneas

Com o objetivo de compreender a origem das águas subterrâneas encontradas em sistemas aquíferos, serão explicadas as fases do ciclo hidrológico. Em seguida, serão apresentados os principais conceitos relacionados ao estudo dos aquíferos, bem como sua classificação de acordo com diferentes critérios.

3.1.1. Ciclo hidrológico e a origem das águas subterrâneas

O ciclo hidrológico pode ser definido basicamente como uma sucessão de constantes deslocamentos e mudanças no estado físico da água na natureza, tendo como grande motor o calor irradiado pelo sol. A energia solar que chega à superfície terrestre na forma de luz e calor provoca elevação da temperatura e ocasiona a evaporação da água, que alcança a troposfera, e, assim, permite a formação das nuvens, que, ao se tornarem pesadas o suficiente, provocam o fenômeno da precipitação e voltam à superfície na forma de granizo, neve ou chuva [5].

A maior parcela da chuva cai no oceano. Porém, a parte que cai nas demais áreas da superfície terrestre pode ser levada para os rios, mares oceanos e lagos, ou ainda se infiltrar pelos poros da terra. Há uma parcela renovável da água subterrânea que está diretamente ligada a processos hidrológicos próximos à superfície, ou seja, faz parte do ciclo hidrológico global [18].



Figura 3.1 Esquema representativo das diferentes fases envolvidas no ciclo hidrológico [24].

Porém, a água pode ainda se deslocar em direção cada vez mais profunda. A intensidade desse movimento varia de acordo com alguns fatores, tais como a permeabilidade do solo (solos argilosos apresentam baixa permeabilidade e impedem a infiltração); cobertura vegetal (solos cobertos por vegetação são mais permeáveis que solos desmatados); inclinação do terreno (a velocidade da água aumenta com a acentuação do declive, o que diminui a possibilidade de infiltração); e tipo de chuva (as mais intensas provocam a rápida saturação do solo, enquanto a água de chuvas finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrar) [3]. Assim, as diferentes fases do ciclo hidrológico (mostradas no esquema da Figura 3.1) esclarecem o caminho que a água percorre até se depositar em sistemas aquíferos subterrâneos.

3.1.2. Classificação dos aquíferos

Um sistema aquífero pode ser definido como um conjunto de formações geológicas encontradas em subsolo, constituídas por rochas permeáveis, com poros e fraturas abertas, capazes de armazenar água, exercendo a função de reservatório, além de permitir a mobilidade dessa água subterrânea pelas suas estruturas [25, 26].

Assim, a velocidade de deslocamento e a qualidade da água subterrânea, bem como a capacidade de armazenamento e explotação dos reservatórios, são fortemente dependentes da porosidade das estruturas encontradas no subsolo e da pressão sofrida pela água armazenada, que determinam os diferentes tipos de aquífero.

Entende-se como porosidade o volume de espaços vazios encontrados entre as rochas e nos sedimentos. Já a permeabilidade indica o quanto esses espaços vazios estão interligados, o que efetivamente permitirá a comunicação entre eles e o fluxo de água pelos poros e fraturas. Trata-se de grandezas diferentes, mas que guardam uma relação entre si. A Figura 3.2 mostra exemplos de rochas com diferentes granulometrias e forma dos grãos, o que gera diferenças na permeabilidade e porosidade.



Figura 3.2 Exemplo de diferenças na granulometria, arranjo e forma dos grãos em rochas, e sua relação com a porosidade e a permeabilidade. Em A, tem-se um exemplo de rocha pouco porosa mas bastante permeável; em B a rocha é tanto permeável como porosa; C mostra uma rocha pouco permeável e pouco porosa; D exibe um exemplo de rocha bastante porosa e pouco permeável. Adaptado de [27].

Ao considerar a porosidade da rocha que armazena água, os aquíferos podem ser classificados em: poroso ou sedimentar; fraturado ou fissural; e cárstico. A Figura 3.3 ilustra as diferenças entre os três tipos, que serão explicados a seguir.

O <u>aquífero poroso ou sedimentar</u> é formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos decompostos *in situ*. A movimentação da água se dá nos espaços vazios, de dimensões reduzidas, denominados poros [16], apresentando porosidade primária. A distribuição dessa porosidade é aproximadamente homogênea (propriedade conhecida como isotropia), permitindo que a água escoe para qualquer direção [13].

Por suas características, as rochas sedimentares geralmente constituem excelentes aquíferos em termos de produtividade de poços e reservas hídricas armazenadas. No Brasil, os terrenos sedimentares ocupam cerca de 48% do

território, o que sugere um grande potencial para a retenção de água subterrânea [17].



Figura 3.3 Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha. Adaptado de [27].

Os <u>aquíferos fraturados ou fissurais</u> são formados por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças. A acumulação e o fluxo da água acontecem pelas fraturas, fendas e falhas (abertas devido a tensões sofridas pelas rochas), que conferem porosidade secundária ao aquífero [13, 16].

No Brasil, os aquíferos fraturados podem ser representados pelos derrames de rochas vulcânicas basálticas das grandes bacias sedimentares. Por serem meios anisotrópicos, a possibilidade de se obter um poço produtivo em aquíferos fissurais dependerá de o mesmo interceptar fraturas, que tendem a ter orientações preferenciais capazes de conduzir a água [28]. Os <u>aquíferos cársticos</u> são formados por rochas calcárias e carbonáticas. Em razão de dissolução de carbonatos pela água, as fraturas podem alcançar grandes dimensões, o que cria condições favoráveis de armazenamento de água em espécies de rios subterrâneos [16]. Entretanto, são heterogêneos, descontínuos, e as águas armazenadas se tornam duras, ou seja, contém elevada concentração de sais de cálcio e magnésio, que dificultam a ação de sabões [5].

De acordo com o armazenamento e a pressão sofrida pela água, os aquíferos podem ser ainda classificados em aquífero livre e aquífero confinado ou artesiano. Para melhor compreensão dessa classificação, é importante entender que durante o ciclo hidrológico, as águas e as formações geológicas que permanecem retidas nas regiões mais próximas da superfície do solo formam a **zona não saturada**; já a região mais profunda, onde todos os poros e fraturas já se encontram totalmente preenchidos por água é denominada **zona saturada** [16, 25, 29]. O limite entre a zona não saturada e a saturada é comumente chamado de lençol freático [16].

O <u>aquífero livre ou freático</u> é constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão. Assim, a pressão da água na superfície da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica (superfície piezométrica), com a qual se comunica livremente. Na sua base, entretanto, é limitado por uma camada impermeável ou semipermeável (de argila, por exemplo) [13, 16]. Consistem nos aquíferos mais comuns e mais explorados pela população, sendo também os que apresentam maiores problemas de contaminação [30].

Quando a água subterrânea está em camadas de rochas ou sedimentos que são limitados no topo e na base por camadas impermeáveis, há a formação do aquífero <u>confinado ou artesiano</u>. Trata-se, assim de uma formação geológica completamente saturada de água. Existem diferentes possibilidades geológicas em que a situação de confinamento pode ocorrer. A Figura 3.4 exibe um modelo clássico, com o aquífero confinado entre um embasamento na parte inferior e um aquífero livre no topo [5]. A contaminação nesse tipo de aquífero é mais rara, já que sua posição o torna mais impermeável e menos vulnerável.


Figura 3.4 Modelo clássico de uma situação de confinamento de um aquífero, entre um embasamento na parte inferior e um aquífero livre no topo [26].

Uma vez que a camada saturada está confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz a água subir. A altura que a água alcança chama-se nível potenciométrico, conforme é representado na Figura 3.4 [16]. Se a pressão for suficientemente forte, a água poderá jorrar espontaneamente e, neste caso, há um poço denominado jorrante, que também está ilustrado na Figura 3.4 [3].

A área por onde acontece o abastecimento do aquífero denomina-se **zona de recarga**. A recarga das águas subterrâneas é fortemente influenciada por fatores climáticos, geologia local, topografia e uso do solo [18]. Assim, as maiores taxas de recarga são verificadas em regiões planas, bastante arborizadas, e principalmente nas áreas de afloramento dos aquíferos livres, alimentadas principalmente pelas chuvas. Considera-se **zona de descarga** aquela por onde as águas subterrâneas emergem dos aquíferos, sendo responsável por abastecer mananciais superficiais.

3.1.3. Sistema Aquífero Guarani

Conforme mostra o mapa da Figura 3.5, o Sistema Aquífero Guarani engloba áreas de oito diferentes estados brasileiros (Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, São Paulo, Paraná, Goiás, Minas Gerais, Santa Catarina e Mato Grosso). Ocupa também parte do território da Argentina, Paraguai e Uruguai.

O Aquífero Guarani formou-se a partir de depósitos arenosos e posteriormente foi recoberto por lava solidificada, que consiste na Formação Serra Geral, e funciona como um manto protetor do aquífero. É formado pela alternância de estratos de diferentes origens e permeabilidades, com capacidade variável de armazenamento de água, [13]. A área total do SAG chega a aproximadamente 1,2 milhão de km², tornando-o um dos mais amplos aquíferos do mundo [26].

A Figura 3.5 também mostra as áreas correspondentes às zonas de afloramento e confinamento. Estima-se que o SAG se encontra confinado em cerca de 90% de sua área, que corresponde ao território onde ocorreram os derrames vulcânicos. Assim, apenas cerca de 10% da sua área é aflorante e recebe recarga. Dessa pequena porcentagem, uma parcela considerável encontra-se no estado do Rio Grande do Sul.

A população brasileira já é atendida pelas águas extraídas do Aquífero Guarani e está estimada em 18,5% da população total. O SAG é uma das reservas de água subterrânea mais importantes em território brasileiro, sendo considerado recurso estratégico para demandas futuras de água [17, 31]. Dos estados brasileiros, São Paulo é o primeiro estado no Brasil em habitantes sobre a área do aquífero. Em segundo lugar está o Paraná e em terceiro encontra-se o Rio Grande do Sul [13]. O SAG ocupa aproximadamente 55% da área do RS, sendo a principal reserva de água subterrânea do estado [17].



Figura 3.5 Mapa mostrando a área de abrangência do Sistema Aquífero Guarani. Estão diferenciadas as zonas de afloramento e de confinamento. Adaptado de [26].

3.1.3.1. Compartimentação estrutural e unidades hidroestratigráficas

No Rio Grande do Sul, o Sistema Aquífero Guarani pode ser subdividido em quatro grandes compartimentos, com características estruturais e hidrogeológicas bem definidas [32, 33]. São denominados: Compartimento Oeste, Compartimento Leste, Compartimento Norte-Alto Uruguai e Compartimento Central-Missões, conforme mostra o mapa da Figura 3.6.



Figura 3.6. Compartimentação estrutural do Sistema Aquífero Guarani para o Rio Grande do Sul, mostrando também a hidroestratigrafia. Adaptado de [32].

No Compartimento Oeste existe uma predominância da direção noroeste para o aparecimento de fraturas e falhas nas litologias basálticas. Apresenta as maiores espessuras do SAG, que chega a mais de 600 m. As linhas de fluxo estão direcionadas especialmente para as grandes drenagens, tendo como destino o rio Uruguai, na divisa com a Argentina. Esse é o compartimento que possui o maior potencial hidrogeológico para o SAG, devido a espessas camadas arenosas presentes nas unidades Botucatu, Guará e Pirambóia [33].

A hidroestratigrafia do Compartimento Central-Missões se mostra favorável a poços tubulares. Há possibilidade de se encontrar aquíferos com poços produtivos, bem como poços secos ou de baixas vazões, quando os mesmos interceptarem camadas de rochas formadas por sedimentos mais finos. O melhor aquífero é representado pela Unidade Passo das Tropas 1 e 2, que faz parte da Formação Santa Maria. No topo ocorrem as Unidades Arenito Mata, Caturrita e Botucatu. Quando o SAG está confinado por litologias vulcânicas, os poços tubulares fazem captação apenas da Unidade Botucatu. As linhas de fluxo na região central do compartimento estão direcionadas para o Sistema de Falhas Terra de Areia-Posadas, ao norte. Já nas áreas aflorantes, os fluxos dirigem-se para as principais

drenagens superficiais. A região central caracteriza-se por um intenso fraturamento, com as mudanças de sentido das falhas nordeste e noroeste a partir das regiões próximas ao município de Santa Maria. Na porção aflorante da região central, o SAG demonstra um grande potencial hidrogeológico [32, 33].

O compartimento leste difere dos demais pelo predomínio de estruturas com direção nordeste, que afetam igualmente o SAG e as litologias basálticas. Apresenta espessuras do SAG que variam entre 100 e 200 m e as condições estruturais e potenciométricas do SAG nesse compartimento fazem com que possua baixa a média potencialidade hidrogeológica. As linhas de fluxo estão direcionadas principalemnte para sul e sudeste, onde estão as áreas de afloramento, porém os vários falhamentos localizados podem provoca um truncamento da continuidade das camadas aquíferas [32].

O Compartimento Norte - Alto Uruguai caracteriza-se pela presença exclusiva da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu e está totalmente confinado pelas litologias vulcânicas da Formação Serra Geral. Nesse compartimento estão os poços tubulares mais profundos do SAG no RS, que correspondem aos poços de águas minerais termais [32].

No território do Rio Grande do Sul, o SAG apresenta um conjunto litológico heterogêneo. Assim, quando analisado a partir de características hidrogeológicas, a divisão em quatro compartimentos estruturais se torna insuficiente para explicar seu funcionamento, resultando na divisão em unidades hidroestratigráficas [32]. As unidades hidroestratigráficas são definidas como um conjunto de formações geológicas, ou partes delas, capazes de armazenar e transmitir águas subterrâneas, caracterizadas por apresentarem valores de produtividade na mesma ordem de grandeza [16]. No Rio Grande do Sul o SAG engloba as unidades hidroestratigráficas Botucatu, Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas, Sanga do Cabral e Pirambóia [17], recobertas na porção confinada do SAG pelo Sistema Aquífero Serra Geral, conforme pode ser visto no mapa da Figura 3.7.



Figura 3.7. Mapa das unidades hidrolitológicas do SAG no Rio Grande do Sul. Adaptado de [32].

O Sistema Aquífero Serra Geral representa uma das maiores manifestações vulcânicas encontradas no registro geológico da história da Terra, que resultaram da

separação dos continentes da América do Sul e África. Assume grande relevância por promover o confinamento dos aquíferos de origem sedimentar do SAG [32]. No RS, ocupa cerca de 50% da superfície [34]. Apresenta porosidade exclusivamente por fraturas, que ocorrem preferencialmente nas direções NE e NW. Apesar do caráter confinante, a formação Serra Geral pode apresentar excelentes características aquíferas em determinados pontos, exibindo poços com elevada vazão [35].

A Unidade Hidroestratigráfica Botucatu compreende todos os afloramentos contínuos de arenito Botucatu ao longo do contato com o grupo Rosário do Sul, estendendo-se abaixo dos derrames da Formação Serra Geral. É constituída por arenitos finos e médios, quartzos e feldspatos. Apresenta estruturas de laminação plano-paralela e estratificações cruzadas do tipo tabular e acanalada, de porte pequeno a muito grande porte. No topo, os arenitos ocorrem intercalados com rochas vulcânicas da Serra Geral [34]. Apresentam porosidade entre 20% e 30%, com condutividades hidráulicas normalmente elevadas, características de poros com alta conexão [31, 35]. Assim, a unidade Botucatu está entre as que apresentam maior potencialidade para a captação de água do estado, apesar das heterogeneidades em relação à litologia, fraturamento e confinamento. A qualidade da água, em geral, é adequada ao uso industrial e agrícola [32].

O grupo Rosário do Sul ocorre apenas no estado do Rio Grande do Sul, compreende as unidades Sanga do Cabral (na base), Caturrita (no topo) e Santa Maria, e está sotoposto aos arenitos da Formação Botucatu [31].

A unidade Sanga do Cabral constitui-se de arenitos finos, encontrados em uma matriz avermelhada de composição argilosa. Assim, a capacidade de armazenamento de águas subterrâneas é pequena, oferecendo poços de baixa vazão e até mesmo secos. A unidade Guará está depositada acima da Formação Caturrita, e portanto acima da Formação Santa Maria. É composta por argilito e arenitos de espessura variável [36].

A unidade Caturrita consiste em folhelhos, siltitos, arenitos finos e médios, intercalados com siltitos e folhelhos e encontrados numa matriz de argila [32].

A unidade Santa Maria é dividida ainda nas formações Alemoa (no topo) e Passo das Tropas (na base). Seus arenitos geralmente apresentam granulometria grossa e aparecem em laminação plano-paralela e estratificação cruzada. Já os pelitos aparecem intercalados com siltitos e arenitos finos. Os siltitos são argilosos e costumam ser maciços [32].

A unidade Arenito Mata constitu-se de sedimentos arenosos grossos e conglomerados, com estratificações cruzadas, planares e tangenciais em abundância. O fator topo-estrutural desfavorece a unidade para fins de armazenamento [32].

Na unidade Piramboia, os afloramentos se apresentam em estruturas estratificadas e cruzadas, de grande porte, tipicamente de sedimentos eólicos. As litologias apresentam porosidade e permeabilidade favoráveis ao potencial aquífero [32].

3.2. O método da eletrorresistividade

No ano de 1912, Conrad Schlumberger introduziu a ideia de usar medidas de resistividade elétrica para estudar corpos rochosos encontrados em subsuperfície e o método foi inicialmente adotado por companhias petrolíferas na busca por reservatórios de petróleo [19]. Surge então o método geofísico da eletrorresistividade (ER), tendo como base a determinação da resistividade elétrica de solos e rochas a partir das propriedades elétricas intrínsecas desses materiais encontrados em subsuperfície, servindo para identificá-los em termos litológicos [21, 22].

O método da eletrorresistividade apresenta como vantagens o fato de não ser destrutivo nem invasivo. Dessa maneira, não afeta a estrutura ou o funcionamento dos solos e ainda minimiza escavações ou perfurações físicas, que requisitam mais tempo e custos elevados [19, 23].

3.2.1. Princípios físicos da resistividade elétrica

No campo da física, a definição de resistividade elétrica é dada pelas leis de Ohm. De acordo com a Primeira Lei de Ohm, considerando-se um condutor qualquer, mantido à temperatura constante, a razão entre a tensão entre dois pontos (V) e a corrente elétrica (i) é constante e denominada de resistência elétrica (R) [37], conforme

$$R = \frac{V}{i}$$
 Eq. 3.1

A Segunda Lei de Ohm diz que a resistência elétrica de um condutor homogêneo e de seção transversal constante é proporcional ao seu comprimento (*C*) e inversamente proporcional à sua área transversal (S_t) [37], de acordo com a relação matemática

$$R = \rho \frac{C}{S_t}$$
 Eq. 3.2

A grandeza ρ é denominada resistividade elétrica e depende da temperatura e da natureza do condutor. A unidade de medida de ρ é o ohm.metro (Ω .m) e pode ser definida como uma medida da dificuldade da corrente elétrica em atravessar determinado material [37], sendo que este fenômeno tem relação com os mecanismos de propagação da corrente elétrica. A resistividade elétrica é inversamente proporcional à condutividade elétrica (σ), podendo ser medida em (Ω .m)⁻¹ ou, de acordo com o Sistema Internacional de Unidades, em S/m (siemens por metro).

3.2.2. Relação entre resistividade elétrica e litologia

A resistividade de materiais geológicos apresenta uma faixa de variação bastante extensa [38], conforme é mostrado na Figura 3.8. As rochas ígneas, por exemplo, apresentam resistividades mais elevadas, enquanto rochas sedimentares

são mais condutivas e rochas metamórficas tendem a ter resistividades intermediárias, com ocasionais valores extremos. A idade da rocha também deve ser analisada, pois rochas mais antigas estão expostas a mais tempo ao recheio secundário de interstícios devido a processos de mineralização e compactação, com consequente redução da porosidade e permeabilidade.

Como foi visto, a resistividade elétrica pode ser definida como a dificuldade de passagem da corrente elétrica num dado material, e isso está ligado aos mecanismos pelos quais a corrente se propaga. Na geologia, tais mecanismos estão classificados em condutividade eletrônica e condutividade iônica ou eletrolítica [22].

A condutividade eletrônica ocorre principalmente em materiais com estrutura homogênea, devido ao transporte de elétrons na matriz da rocha [22]. Nesse caso a resistividade está ligada ao modo como os minerais estão agregados, bem como ao tipo de material do qual a rocha é formada, e o grau de impurezas da rocha [21].

Já a condutividade iônica ou eletrolítica está relacionada ao deslocamento de íons dissolvidos já existentes na água que preenche os poros, sedimentos ou fissuras das rochas [22], e é esse o tipo de mecanismo de maior relevância nos estudos aplicados à hidrogeologia [23]. Assim, a resistividade elétrica dos solos é fortemente dependente da sua mineralogia, da porosidade do material, do teor de água, da temperatura da solução aquosa contida nos poros, da concentração dos íons e da natureza dos sais dissolvidos, pois diferentes tipos de íons afetam a resistividade elétrica de maneira diferente, uma vez que sua mobilidade também varia [19, 22].

Uma rocha capaz de conduzir corrente elétrica é formada por minerais sólidos, líquidos e gases, sendo sua resistividade influenciada pela resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha e dos líquidos e gases contidos em seus poros, pela permeabilidade e porosidade da rocha e pelos processos que ocorrem entre a estrutura mineral e os líquidos. A resistividade elétrica de rochas cristalinas, por exemplo, possui tipicamente valores elevados, devido à baixa porosidade. Porém, diante da presença de fraturamentos na referida rocha, a água que circula por meio das fraturas diminuirá consideravelmente a resistividade da rocha, por conter sais minerais dissolvidos [23].



Figura 3.8 Faixas de resistividade e condutividade relacionada à litologia de diferentes rochas. Adaptado de [39, 40].

A diferença de potencial natural, resultante de reações eletroquímicas e eletrocinéticas que ocorrem em subsuperfície, medida por um eletrorresistivímetro enquanto não há corrente fluindo, é denominada potencial espontâneo SP, ou auto-potencial [41]. As reações eletroquímicas ocorrem quando há contato entre águas com concentrações salinas diferentes e os íons se difundem no sentido da maior diluição, criando uma corrente elétrica devido à diferença de mobilidade entre eles. Já efeito eletrocinético se faz presente em rochas porosas saturadas com fluido salino e está associado à formação de uma dupla camada de cargas elétricas nas paredes dos poros da rocha. Assim, íons de sinal contrário são adsorvidos e forma-se no fluido uma camada iônica com uma parte difusa, que pode se movimentar mediante uma diferença de pressão, o que gera uma corrente elétrica por convecção [42].

3.2.3. Fluxo de corrente em subsuperfície

O método da eletrorresistividade está baseado fundamentalmente no estudo do potencial elétrico nos campos elétricos naturais, já presentes na crosta terrestre, e também no potencial elétrico dos campos induzidos de maneira artificial. O mais comum é injetar corrente elétrica no terreno a ser analisado, através do contato direto com o solo, de modo a criar campos artificiais cuja deformação oferece informações acerca das heterogeneidades encontradas na subsuperfície, capazes de indicar características geológicas ou minerais do subsolo. Assim, na geofísica, o estudo da resistividade elétrica se dá a partir da compreensão do fluxo de corrente através do meio que se deseja investigar [19, 22, 43].

Ao se considerar a subsuperfície um semiespaço homogêneo e isotrópico, observa-se que a corrente injetada pelos eletrodos A e B flui radialmente, e as superfícies equipotenciais são hemisféricas [22, 43], conforme mostra a Figura 3.9.

Todavia, sabe-se que o subsolo não pode ser tratado como um meio homogêneo. Ao contrário, os meios geológicos comumente estudados são heterogêneos, pois incluem o solo e rochas estratificadas subjacentes com diferentes propriedades elétricas [23]. Portanto, numa situação real, as linhas de fluxo de corrente e as linhas de equipotencial irão formar um padrão mais complexo que aquele mostrado na Figura 3.9, onde se considera um meio homogêneo. O campo elétrico irá sofrer modificações em função da heterogeneidade dos materiais geológicos encontrados [40, 44]. Conforme pode ser observado na Figura 3.10, as linhas de fluxo de corrente irão se curvar, indicando uma mudança na resistividade elétrica, ou seja, a alteração no fluxo da corrente elétrica consiste na base para a descoberta da presença de interfaces entre materiais distintos [43, 45].

A resistividade elétrica total medida em subsuperfície durante levantamentos geofísicos que investigam sistemas multicamadas não corresponde à resistividade elétrica verdadeira de uma determinada rocha ou camada. Os valores obtidos equivalem a uma média ponderada das resistividades dos vários materiais perpassados pela corrente elétrica [43]. Nesse caso, os pesos a serem considerados na média ponderada correspondem ao tipo de litologia das camadas

[23]. Essa grandeza é denominada resistividade aparente $\rho(a)$ e reflete as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passou [20, 23].



Figura 3.9 Representação do fluxo de corrente e das superfícies equipotenciais devido à passagem de corrente elétrica através dos eletrodos A e B, considerando-se um meio homogêneo [43].



Figura 3.10 Representação do fluxo de corrente e das superfícies equipotenciais devido à passagem de corrente elétrica através dos eletrodos A e B, considerando-se um meio heterogêneo, onde a interface encontra-se numa profundidade de 5 m [43].

Igualando-se as relações matemáticas que definem primeira e a segunda lei de Ohm, expressas na Eq. 3.1 e na Eq. 3.2 tem-se que:

$$\frac{V}{i} = \rho \frac{C}{S} \Longrightarrow \rho = \frac{V}{i} \frac{S}{C} \Longrightarrow \rho = R \frac{S}{C}$$
 Eq. 3.3

Como em experimentos reais o solo não pode ser considerado um meio homogêneo, os valores de área S e comprimento C não podem ser definidos, pois dependem do modo como os eletrodos de corrente e de potencial são dispostos e movimentados ao longo da linha de investigação. Assim, a razão S/C mostrada na Eq. 3.3 é substituída pelo fator geométrico k, que depende do arranjo de eletrodos empregado no levantamento, conforme será visto na próxima seção [19, 22]. Assim:

$$\rho(a) = R \cdot k$$
 Eq. 3.4

3.2.4. Arranjos dos eletrodos e fator geométrico

Os valores de área e comprimento das diferentes camadas identificadas através de medidas de eletrorresistividade dependem da geometria do arranjo dos eletrodos no terreno. Diversos arranjos de desenvolvimento de campo podem ser adotados, conforme a complexidade e o objetivo do levantamento. Eles dizem respeito à disposição e movimentação dos eletrodos e conferem grande versatilidade ao método [23, 40].

A configuração usual é formada por quatro eletrodos, denominados A, B, M e N, conforme pode ser visualizado na Figura 3.11. O par de eletrodos AB é utilizado para injetar a corrente elétrica no subsolo, enquanto o par MN serve para mensurar a diferença de potencial gerada entre eles, como resultado da passagem da corrente.



Figura 3.11 Configuração tetraédrica usual de campo [23].

Para melhor compreensão dos diferentes arranjos de eletrodos, cabe apresentar as grandezas envolvidas:

a = espaçamento mínimo entre os eletrodos, dado em metros (m);

L = comprimento total da linha de investigação, dado em metros (m);

n = nível de investigação;

mp = *mid-point*, que corresponde ao ponto central entre os pares de eletrodos, dados em metros (m).

AB = nome dado ao par de eletrodos de injeção de corrente

MN = nome dado ao par de eletrodos de leitura de diferença de potencial

Linhas equipotenciais apresentam a mesma diferença de potencial e intersectam as linhas de fluxo de corrente em ângulos retos, cuja densidade de corrente \vec{J} é dada por

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$
 Eq. 3.5

Onde σ é a condutividade elétrica, medida em S/m e E corresponde ao campo elétrico, expresso em V/m. Sabe-se que a condutividade elétrica ρ é o inverso da resistividade elétrica, conforme

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$
 Eq. 3.6

Assim, a expressão para o campo elétrico pode ser escrita em função de ρ e de \vec{J} :

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J}$$
 Eq. 3.7

Conforme a Eq. 3.4, os valores de resistividade aparente são fortemente dependentes do fator geométrico k, ou seja, estão relacionados à geometria de eletrodos adotada, que determina o tipo de arranjo. A partir da relação matemática que define o campo elétrico (Eq. 3.7), é possível chegar a uma equação para k, considerando-se a configuração usual dos eletrodos AMNB, mostrada na Figura 3.12. Cabe lembrar que a densidade de corrente *J* pode ser definida como a razão entre a corrente elétrica e a área:

$$J = \frac{i}{S_{se}} = \frac{corrente \ elétrica}{\acute{a}rea \ da \ semiesfera} = \frac{i}{2\pi r^2}$$
Eq. 3.8

Como o campo elétrico é definido por dV/dr, e de acordo com a Eq. 3.7:

$$\frac{dV}{dr} = \rho \cdot J = \rho \frac{i}{2\pi r^2}$$
 Eq. 3.9

$$V = \int \rho \frac{i}{2\pi r^2} dr = \rho \frac{i}{2\pi} \int r^{-2} dr = \rho \frac{i}{2\pi} r^{-1} = \frac{\rho i}{2\pi r}$$
 Eq. 3.10

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right) = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$
 Eq. 3.11

Como:

•

$$\Delta V = \frac{\rho \iota}{k}$$
 Eq. 3.12

Então:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}\right)}$$
 Eq. 3.13

Como resultado, o arranjo de eletrodos exerce forte influência em parâmetros do levantamento geoelétrico como: resolução, cobertura de dados, profundidade de investigação, acoplamento eletromagnético e razão sinal/ruído. A Tabela 3.1 mostra uma síntese do desempenho em campo do arranjos dipolo-diplo, Wenner e Schlumberger, considerando tais parâmetros. Cada um dos diferentes arranjos apresenta vantagens e desvantagens, e, assim, a escolha do mais adequado dependerá dos objetivos do experimento [19, 34, 44].

Tabela	3.1.	Comparação	do	desempenho	dos	principais	arranjos	de	eletrodos,	considerando
diferent	es pa	râmetros [19, 2	20, 2	2, 43, 46].						

Borômotro	Arranjos de eletrodos					
Falametro	Dipolo-dipolo	Wenner	Schlumberger			
Sensibilidade a mudanças horizontais (resolução horizontal)	***	*	**			
Sensibilidade a mudanças verticais (resolução vertical)	**	***	**			
Cobertura horizontal dos dados	***	*	**			
Profundidade de investigação	***	*	**			
Acoplamento eletromagnético	***	*	*			
Razão sinal/ruído	*	***	**			

★ moderado

★★ bom

 $\star \star \star$ muito bom

Algumas características dos principais arranjos empregados em trabalhos de campo serão apresentadas e discutidas a seguir.

Arranjo dipolo-dipolo

Nesse arranjo, o espaçamento "a" entre os eletrodos de corrente (AB) é igual ao espaçamento entre os eletrodos de potencial (MN). A profundidade de investigação cresce à medida que o par MN é deslocado ao longo da linha de investigação. O valor de resistividade elétrica aparente é medido em um ponto da subsuperfície situado na intersecção das retas que partem num ângulo de 45° do centro dos dipolos, ou seja, localiza-se no ponto médio entre eles, conforme pode ser visto na Figura 3.12.



Figura 3.12 Esquema de aquisição de dados de resistividade elétrica utilizando-se o arranjo dipolodipolo [23].

O fator geométrico para os arranjo dipolo-dipolo é dado por:

$$k_{dipolo-dipolo} = n\pi a \left(n+1 \right) \left(n+2 \right)$$
 Eq. 3.14

Uma das principais configurações aplicadas é a dipolo-dipolo. É considerado um dos mais tradicionais e importantes arranjos dentro das investigações geoelétricas e revela-se como um dos mais precisos em campo. O estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidades, obtendo-se uma caracterização dos materiais em subsuperfície tanto vertical como horizontalmente [23]. De acordo com a Tabela 3.1, Apresenta como maior vantagem uma resolução horizontal muito boa. Isso significa que seu padrão de contorno é quase-vertical, ou seja, é mais sensível a mudanças horizontais de resistividade, o que torna a configuração adequada para mapear estruturas verticais. A resolução vertical é inferior à obtida com o arranjo Wenner, mas ainda assim é considerada boa. Além disso, o efeito de acoplamento eletromagnético entre os circuitos de corrente e de potencial é o melhor entre os arranjos estudados. Outra vantagem apresentada pelo arranjo dipolo-dipolo é tempo de aquisição de dados é menor, se comparado com os arranjos polo-dipolo e polo-polo [22].

Um estudo [47] mostrou as vantagens do uso da configuração dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e ambientais, comparando-o com os arranjos Wenner e Schlumberger. A maior profundidade de investigação (considerada muito boa, de acordo com a Tabela 3.1) permitiu resolver questões importantes. Foi possível determinar a profundidade de um embasamento de uma porção rasa da Bacia Sedimentar de São Paulo, uma vez que auxiliou da identificação da topografia do embasamento, que corresponde a uma feição relevante na avaliação e exploração de recursos hídricos subterrâneos. Na caracterização de depósitos de resíduos desativados, a sondagem dipolo-dipolo foi capaz de estimar a espessura da zona não saturada, identificar a posição da zona saturada e fornecer informações sobre indícios de contaminação. Assim, o arranjo dipolo-dipolo demonstrou que pode ser utilizado como estratégia de estudos locais específicos de áreas com problemas similares, pois profundidades de investigação menores obtidas com os demais arranjos não foram capazes de oferecer informações relevantes.

Outros trabalhos, publicados em periódicos nacionais [48, 49, 50] e internacionais [51, 52, 53], vêm colocando o arranjo dipolo-dipolo em destaque no estudo de recursos hídricos subterrâneos, confirmando a eficiência e as vantagens da sua utilização.

O arranjo dipolo-dipolo foi empregado para realizar caminhamento elétrico a fim de caracterizar o Sistema Aquífero Barreiras / Marituba, maior fonte de abastecimento de água de Maceió, capital do estado de Alagoas. Através dos levantamentos geofísicos, foi possível identificar zonas mais condutoras, cujas anomalias são tipicamente devido à presença de estruturas verticais que caracterizam zonas de falhas que delimitam blocos estruturais. A integração desses resultados com dados geológicos permitiu aprimorar o modelo estrutural para a área de estudo, onde a sucessão de camadas sedimentares com diferentes teores de argila, aliada à presença de falhas que determinam as posições relativas dessas camadas, exerce influência marcante no comportamento dos aquíferos em subsuperfície [48].

Um trabalho importante foi realizado no aquífero fraturado na região de Lindóia, no estado de São Paulo. Primeiramente, definiu-se como área de estudo uma zona extremamente favorável à ocorrência de água subterrânea. Então, foi executado um estudo detalhado, através do mapeamento de fraturas por fotografias aéreas e pelo método geofísico da eletrorresistividade (sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico empregando o arranjo dipolo-dipolo). Os resultados geofísicos revelaram a baixa espessura do solo e do manto de intemperismo na área, o que demonstra a sua pequena influência nos processos hidrogeológicos, sendo as fraturas encontradas os principais condicionantes da região de Lindóia. A integração dos referidos dados com informações geológicas e dados de poços permitiu a obtenção de resultados satisfatórios em relação à definição de locais favoráveis para a locação de novos poços tubulares profundos [49]. Nesse caso, o arranjo dipolo-dipolo foi utilizado por se tratar de um arranjo simétrico, o que facilita a interpretação de uma pseudo-seção, principalmente quando o objetivo é determinar com segurança a posição de uma anomalia [54].

No município de Duque de Caxias/RJ, foram realizados levantamentos geofísicos de eletrorresistividade com o arranjo dipolo-dipolo em áreas de ocorrência de rochas granito-gnáissicas, com vistas à detecção de falhas e fraturas, entre outras estruturas de interesse hidrogeológico. Os levantamentos contribuíram fundamentalmente para o conhecimento do sistema aquífero da região. Nos locais indicados com anomalias de baixa resistividade elétrica, foram feitas perfurações que resultaram em poços de produtividades de 75 e 130 m³/h, valores considerados elevados para aquíferos fraturados. Assim, o método da eletrorresistividade revelou sua eficácia na detecção de zonas fraturadas ou com falhas, e na indicação de locais favoráveis à locação de poços para explotação de águas subterrâneas [50].

Na Coreia do Sul foi realizado um estudo da contaminação das águas subterrâneas na área de um aterro não controlado. Com a utilização do arranjo dipolo-dipolo durante os levantamentos geofísicos, foi possível identificar a zona contaminada, que se diferencia da zona limpa por apresentar valores de resistividade elétrica mais baixos. A elevação da condutividade ocorre devido a alta concentração de íons presentes na água encontrada em subsuperfície, quando essa está contaminada. A diferença, no caso em estudo, chegou a cerca de 100 Ω .m [52].

Nos Estados Unidos, no estado da Virgínia, também foram realizados levantamentos de eletrorresistividade com o arranjo dipolo-dipolo, escolhido devido à sensibilidade para identificação da interface solo-rocha [53]. O método da resistividade elétrica foi empregado em conjunto com a técnica de reflectometria no domínio do tempo para medir simultaneamente a resistividade e a umidade do solo, com o objetivo de quantificar a umidade do solo em perfis 2D de zonas não saturadas [55].

Um estudo realizado em ambiente típico do Mediterrâneo destaca a eficiência da combinação de técnicas geofísicas para o estudo de uma zona insaturada cárstica. Os resultados oferecidos a partir do radar de penetração no solo (GPR) mostram uma imagem de alta resolução próxima à superfície, com informações geológicas importantes, como estratificações e fraturas. Já o método da resistividade elétrica, incluindo o arranjo dipolo-dipolo, exibe variações laterais e verticais, que informam sobre a estrutura geológica geral e a orientação das estruturas. A presença de zonas de resistividade moderada pode explicar a presença de um fluxo de água perene a 35 m abaixo da superfície do local estudado [51].

<u>Arranjo Wenner</u>

No arranjo Wenner, a menor distância "a" entre dois eletrodos adjacentes é a mesma. A profundidade de investigação aumenta com o incremento do espaçamento entre os eletrodos, sempre múltiplo de "a", conforme é mostrado na Figura 3.13.

De modo similar ao que ocorre com o arranjo dipolo-dipolo, o ponto atribuído para o imageamento por ser obtido a partir da intersecção das retas que partem do ponto médio entre os eletrodos A e M e entre B e N, ambas num ângulo de 45° em direção ao subsolo.



Figura 3.13 Esquema de montagem no arranjo Wenner, com espaçamento entre os eletrodos mantido constante. Adaptado de [38].

O fator geométrico para os arranjo Wenner é dado por:

$$k_{Wenner} = 2\pi a$$
 Eq. 3.15

O arranjo Wenner é capaz de oferecer resultados satisfatórios no mapeamento de estruturas horizontais, uma vez que é o mais sensível às mudanças verticais na resistividade dos materiais encontrados em subsuperfície, de acordo com a Tabela 3.1. Destaca-se ainda como vantagem a elevada razão sinal/ruído, porém apresenta rápida perda de cobertura horizontal com a profundidade de investigação.

Arranjo Schlumberger

A sondagem elétrica vertical (SEV) consiste em uma técnica de eletrorresistividade aplicada em campo quando se deseja uma informação pontual,

com observação da variação vertical da resistividade. O arranjo de eletrodos mais comumente utilizado para se realizar SEV é o Schlumberger, pois apresenta como vantagem grande potencial para resolução de camadas horizontais, uma vez que possui boa resolução vertical. O método Schlumberger consiste na disposição de arranjo simétrico dos eletrodos em relação ao ponto central, com o conjunto de eletrodos de potencial M e N posicionados entre o par de eletrodos de corrente A e B, conforme o esquema da Figura 3.14.



Figura 3.14 Esquema de montagem no arranjo Schlumberger. Adaptado de [38].

As medidas de resistividade aparente adquiridas a partir de uma SEV são apresentadas em gráficos cuja escala é bilogarítmica, em função de AB/2, ou seja, metade da distância entre os eletrodos de corrente.

O fator geométrico para os arranjo Schlumberger é dado por:

$$k_{Schlumberger} = \frac{\pi}{a} \left[\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2 \right]$$
 Eq. 3.16

Uma vantagem relevante do arranjo é que a sensibilidade a efeitos laterais, característica indesejável à técnica de sondagem elétrica vertical, pode ser reduzida com sua utilização.

A escolha do espaçamento "a" entre os eletrodos, em quaisquer arranjo, é feita considerando-se as características do fluxo de corrente elétrica em subsuperfície. Supomos um subsolo onde há duas camadas de materiais com resistividades elétricas diferentes. A camada mais resistiva se encontra mais próxima à superfície, e a camada mais condutiva está abaixo dela, a 5 m de

profundidade, conforme o exemplo da Figura 3.10. Quando o espaçamento entre os eletrodos de corrente é muito menor que a profundidade do limite entre as duas camadas, ou seja, menor que 5 m, a maior parte da corrente não irá alcançar a região de resistividade mais baixa. Isso significa que a resistividade total medida na superfície será principalmente devido ao material que fica acima dos 5m. Quando os eletrodos de corrente estão mais afastados, a corrente penetra cada vez mais na região inferior, e a resistividade total medida diminui. Quando o espaçamento entre os eletrodos de corrente é muito maior que a profundidade onde se encontra a interface entre as duas camadas (5m), a corrente irá se concentrar na região de menor resistividade (camada inferior) e assim, a resistividade medida na superfície será principalmente devido a esse material mais condutivo, ficando prejudicada a detecção da camada superior (mais resistiva) [43].

3.2.5. Profundidade de investigação

No contexto do método da resistividade elétrica, é importante estimar previamente a profundidade de investigação *DOI* (*Depth of Investigation*) que o levantamento irá alcançar, pois assim torna-se possível escolher de maneira mais assertiva a configuração de eletrodos a ser empregada em campo, e adotar uma visão realista sobre objetivos que podem ser atingidos com o estudo. O primeiro conceito de profundidade de investigação de que se tem registro foi estabelecido do ano de 1938 e define essa grandeza como a profundidade na qual uma fina camada, paralela à superfície do terreno, contribui ao máximo para o sinal total medido no solo [56].

Desde então, diversos pesquisadores buscam uma relação entre a profundidade de investigação e parâmetros associados ao método da eletrorresistividade, como o tipo de arranjo e o comprimento da linha de investigação "L". O mais comum é estabelcer uma relação linear de DOI, com L, de acordo com

$$DOI = c \cdot L$$
 Eq. 3.17

Onde c é uma constante de proporcionalidade.

A Tabela 3.2 mostra os valores de c para três arranjos de eletrodos distintos, previstos em três estudos diferentes, realizados nos anos de 1971 [57], 1977 [58] e 1989 [59].

	c, de acordo com:						
Arranjo	[57]	[58]	[59]				
Dipolo-dipolo	0,195	0,25	0,25				
Wenner	0,11	0,173	0,17				
Schlumberger	0,125	0,19	0,19				

Tabela 3.2. Profundidade de investigação estimada para os arranjos dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger, de acordo com três estudos diferentes.

Alguns fatores podem gerar influência sobre o fluxo de corrente elétrica em subsuperfície e, consequentemente, impactar na profundidade de investigação. Entre eles está a heterogeneidade dos materiais e estruturas litológicas, as variações na topográfia do terreno e os ruídos, que podem ser naturais ou oriundos do instrumento. Devido a esses fatores, é correto afirmar que a profundidade de investigação é teórica e difícil de determinar, pois nem sempre apresenta total correspondência com a posição real do objeto examinado e sua verdadeira resistividade elétrica [39, 47].

Apesar do esforço de cientistas em determinar a profundidade de investigação de maneira segura, os valores encontrados ainda são objeto de discussão. Entretanto, tornou-se consenso que as profundidades alcançadas ao se empregar o arranjo dipolo dipolo são sempre maiores que as alcançadas pelos arranjos Schlumberger e Wenner [57, 58, 59].

3.2.6. O método da eletrorresistividade na investigação de águas subterrâneas

Os métodos geoelétricos se originaram no século XVIII e, tradicionalmente, sua utilização está ligada à investigação de jazidas de forte interesse econômico, como petróleo e outros recursos minerais, o que possivelmente explica a cotação desses métodos a preços muito altos no mercado de serviços, limitando seu uso na prospecção de águas subterrâneas [20]. Todavia, essa tendência está mudando, e sua implementação no estudo de águas subterrâneas vem ocorrendo de forma gradativa, uma vez que estas despontam como um recurso de interesse mundial.

Métodos elétricos são utilizados em 55% dos casos de estudos geofísicos de águas subterrâneas. Em 20% dos casos são empregados métodos sísmicos, especialmente o método de reflexão. Em 10% dos estudos geofísicos são aplicados outros métodos, entre eles, o de polarização induzida, radar terrestre ou magnetolelúrico. Métodos potenciais, como a gravimetria e a magnetometria, têm uma participação de 10%. Em 5% dos casos, foram utilizados demais métodos, não citados. O estudo [20] reúne aspectos do uso de técnicas geofísicas para o uso de águas subterrâneas e foi realizado a partir da consulta em revistas especializadas de geofísica nos últimos 22 anos, que incluíam trabalhos realizados ao redor do mundo.

Dentro do estudo de águas subterrâneas, as principais aplicações do método da eletrorresistividade são: a identificação de propriedades hidrogeológicas do solo; obtenção de informações a respeito da estrutura geológica e litologia de aquíferos, especialmente os rasos; diferenciação da água de acordo com o teor de sais dissolvidos, o que permite o estudo do fenômeno de intrusão salina e exploração de águas encontradas em subsuperfície [19, 22, 41, 45].

O emprego do método da ER também é bastante difundido na área ambiental, destacando-se: no monitoramento da poluição de águas subterrâneas; na identificação de plumas de contaminação e delineamento de transferência de solutos e na investigação da vulnerabilidade de aquíferos através da determinação da presença e das dimensões da camada de argila [19, 22, 41, 45]. Diversos são os exemplos de aplicação do método da eletrorresistividade na prospecção de águas subterrâneas, bem como na caracterização geoelétrica e hidrogeológica dessas águas, conforme serão elencados alguns a seguir [60-64].

Em São Paulo, foi realizada caracterização hidrológica de área de recarga do Aquífero Guarani, obtendo-se informações de fluxo, profundidade e diferentes litologias tanto do aquífero livre como do substrato impermeável [61]. Em Minas Gerais, foi feito um estudo do fluxo de água no solo e recarga aquífera. A eletrorresistividade se mostrou eficiente para avaliação da recarga mesmo em se tratando de diferenças sutis nas propriedades hídricas do solo [63].

Na Bacia do Alto Rio Curaçá, localizada no estado da Bahia, junto de outras técnicas, apresentou-se a proposição de um modelo hidrogeológico de armazenamento e transmissão da água, bem como o aperfeiçoamento do modelo geoelétrico, para aumentar a resolução e a explicação dos mecanismos de salinização da água, bem como informações de fluxo [62].

No entorno da Lagoa da Confusão, em Tocantins, fez-se a caracterização dos fluxos subsuperficiais em seu entorno. Identificou-se a evolução do relevo da área, indicando possível falha geológica no sentido Sul-Norte, que controla os fluxos hídricos subsuperficiais atuais [64].

Os dados hidrogeológicos obtidos através no método geofísico da eletrorresistividade tem se mostrado úteis, em alguns casos, também para a locação de poços [65-67].

Um exemplo está na cidade de Rorainópolis, no estado de Roraima, onde diante da necessidade de melhoria do sistema de abastecimento de água, foi realizado um estudo geofísico com o método da ER, o que permitiu identificar a ocorrência de anomalias indicativas da ocorrência de fraturas em subsuperfície, sabendo-se que o padrão de fraturamento já demonstrara condições favoráveis a acumulação e circulação de águas subterrâneas. Foi possível identificar 7 pontos propícios a perfuração de poços tubulares, dos quais 4 foram construídos, e um deles apresentou a maior vazão obtida em terrenos cristalinos no interior de Roraima. A construção dos quatro poços tubulares e a realizaçãodo dos levantamentos geofísicos geraram um custo equivalente a menos de 10% dos custos previstos para a construção de uma adutora para captação por meio de motobombas, que havia sido indicada por relatório técnico preliminar [65].

Outro caso de sucesso do emprego no método da ER na locação de poços é encontrado no estado da Paraíba, composto em cerca de 80% por rochas

cristalinas. Devido ao baixo volume de chuvas e à baixa capacidade de infiltração e armazenamento da água, o estado apresenta potencial hidrogeológico reduzido. A existência de água subterrânea está condicionada a presença de fissuras ou fraturas. Assim, os levantamentos de eletrorresistividade buscaram identificar descontinuidades na subsuperfície, especialmente as preenchidas por água. Foram indicados seis pontos com maior chance de sucesso na perfuração de poços [66].

Na região do Distrito Federal, foram investigadas, através do método da ER, áreas de um maciço intensamente fraturado que faz parte dos grupos Paranoá e Bambuí, cuja fraturas são responsáveis por manter e regular a alimentação dos sistemas hidrogeológicos. Os resultados mostraram que os dados geofísicos são eficientes no mapeamento das fraturas que armazenam água, pois permitiram indicações para futuras locações de poços. A interpretação integrada dos dados geológicos resultou na identificação de conectividade das estruturas em subsuperfície, confirmando a presença de água e a existência de um sistema hidráulico comunicante alimentado por duas fraturas distintas [67].

O método da eletrorresistividade também tem mostrado sua importância para a área ambiental, pois através dele vem sendo estudada a contaminação de recursos hídricos subterrâneos, dentro e fora do Brasil [68-73].

Em Rio Claro (São Paulo), foi realizado monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado entre os anos de 1999 e 2008. Identificou-se a contaminação por chorume e dois sentidos diferentes do fluxo da pluma, que ficou mais extensa e profunda ao final do período analisado [69]. Em Piracicaba, também no estado de São Paulo, foi possível delimitar, através do método da resistividade elétrica, as áreas impactadas por necrochorume no cemitério municipal de Vila Rezende [70].

No município de Ji-Paraná, em Rondônia, detectou-se que em áreas com elevadas concentrações de compostos orgânicos a pluma de contaminação migra através da zona não saturada e chega ao aquífero. Cruzaram-se dados geoelétricos com dados relacionados a análises físico-química das águas [68]. Foi empregado o método da resistividade elétrica para investigar também as condições geológicas e hidrológicas na subsuperfície localizada no entorno do Cemitério Municipal de Alagoinhas, no estado da Bahia. Os resultados permitiram: mapear o nível estático da água subterrânea, indicar que as zonas subsuperficiais de baixas resistividades correspondem a plumas de contaminação na parte superior do aquífero e detectar heterogeneidades elétricas na região não saturada do aquífero, apontando feições indicativas de rotas de invasão do contaminante [74].

No Texas (Estados Unidos), foram investigados potenciais impactos na qualidade de aquíferos devido a vazamento de CO₂ [73].

No estado Tamilnadu, localizado ao sul da Índia, houve a identificação de poluição em áreas altamente industrializadas, devido à contaminação do solo e do aquífero raso por efluentes [72].

No Golfo de Suez, localizado no Egito, um estudo empregou o método da eletrorressitividade para mostrar a diferenciação de seis unidades geológicas camadas diferentes, entre elas: cascalho, argila, arenito, calcário, água e água salgada [60].

O método geofísico da resistividade elétrica conquistou visibilidade nos últimos anos e é amplamente difundido no Brasil e no mundo no contexto da prospecção de recursos hídricos subterrâneos. Na Figura 3.15 tem-se o mapa do Rio Grande do Sul, onde estão marcados 7 pontos correspondentes a alguns municípios onde foram realizados experimentos empregando-se o método da eletrorresistividade. Dois dos estudos estavam ligados a área de engenharia ambiental [71, 75], outros 2 tiveram como objetivo a prospecção mineral [76, 77] e os 3 restantes envolveram pesquisa de águas subterrâneas [78-80], conforme será relatado a seguir.

No município de Caçapava do Sul foi realizado um estudo envolvendo 23 poços rasos, locados em zona de aquífero livre [78]. Através do uso intensivo de ferramentas geofísicas, foi estabelecida uma relação inversamente proporcional entre resistividade elétrica e vazão e assim o método empregado permitiu

comprovar que calibrações prévias associando dados de eletrorresistividade a dados de poços tornam possível compreender fenômenos hidrogeológicos e estimar a produção de poços durante etapas de planejamento de perfuração dos mesmos, em especial em áreas com número reduzido de poços.



Figura 3.15.Mapa do Rio Grande do Sul mostrando os pontos do estado onde foram realizados estudos empregando o método geofísico da resistividade elétrica por outros autores.

Foi realizada a caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas do município de São Gabriel, no Rio Grande do Sul [79]. Para tanto, foram utilizadas análises físico-químicas de 55 amostras de água de poços tubulares, além de dados de perfis geológicos e construtivos dos respectivos poços, que se encontravam em diversos contextos hidrogeológicos. Também foram considerados dados geofísicos de 17 perfis elétricos previamente adquiridos pelo CPRM (Servçio Geológico do Brasil) com vistas à pesquisa de carvão na região. Os principais aquíferos da região são o Aquífero Rio Bonito (ARB) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG). Através do estudo é possível afirmar que nas regiões compreendidas pelas unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná, os poços deverão ser perfurados até o Aquífero Rio Bonito, mesmo que em profundidades maiores. Recomendou-se que, diante da necessidade de perfuração de novos poços, os critérios hidro-estratigráficos sejam preponderantes na elaboraço dos projetos. O trabalho ainda sugere que sejam obtidos perfis geofísicos de poços no

momento da perfuração para que sejam isoladas as camadas que contém água salinizada das que contém água mais doce.

No município de Farroupilha, tem-se o relato de um caso de sucesso de aplicação no método da eletrorresistividade para prospecção de água subterrânea [80]. A execução do trabalho ocorreu em um terreno com ocorrência de rochas basálticas, que pertencem a uma empresa da região. Utilizou-se o arranjo dipolodipolo, uma vez que apresenta melhor resolução vertical aliada a um maior poder de penetração, permitindo determinar, em profundidade, as estruturas rochosas e atingir uma maior profundidade de investigação. Foram obtidos dois perfis elétricos, perpendiculares à feição indicativa de falha previamente identificada. Em um deles, encontrou-se um truncamento por falhas onde não se registra a continuidade da estrutura na direção norte. No outro, verificou-se um espessamento maior das rochas em uma estrutura continuada na direção nordeste-sudoeste. Marcaram-se os locais para a perfuração, onde havia maior probabilidade de ocorrência de água. Encontrado o aquífero, obteve-se poços com vazões de 5 m³/h e 20 m³/h, demonstrando o êxito da operação e a importância da utilização de técnicas geofísicas na prospecção de recursos hídricos subterrâneos.

Tem-se, em Lavras do Sul, um exemplo de aplicação do método da resistividade elétrica em estudos ambientais dentro do estado do RS [75]. A área investigada consiste em uma antiga pedreira que foi reaproveitada para a deposição dos resíduos do município. Foram adquiridos 12 perfis elétricos empregando os arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger. Assim, foi determinada uma possível presença de zonas de contaminação e percolação de lixiviado para fora da área do lixão. Também foi possível indicar a localização dos resíduos sólidos e os limites do lixão, bem como zonas fraturadas com a presença de lixiviado. Dessa maneira, a geofísica demonstrou ser uma ferramenta importante no estudo de contaminações em rochas cristalinas, devido a sua capacidade de detecção de fraturas e à profundidade atingida.

Levantamentos utilizando o método da eletrorresistividade foram executados pela Petrobrás no município de Canoas/RS, com o objetivo de diagnosticar o lençol freático em áreas de refinaria REFAP [71]. Nos sedimentos saturados, os valores de resistividade definiram duas camadas arenosas, uma correspondendo ao aquífero livre e outra ao confinado, que está limitado entre duas camadas de argila. Assim, foram identificadas zonas nas quais o aquífero estaria mais protegido frente a contaminantes e zonas de riscos prováveis de contaminaçãao. Também foram sugeridas áreas para a instalação poços de monitoramento.

Levantamentos geofísicos realizados no município de São Sepé mostram um exemplo de aplicação do método na prospecção mineral [76]. Foram realizadas 6 linhas de caminhamento elétrico com o objetivo de investigar a ocorrência de estanho (cassiterita), que está associada a veios de quartzo inseridos nos quartzos xistos do Complexo Metamórfico Vacacaí. Os modelos de inversão 2D indicaram áreas de alta cargabilidade interpretadas como as prováveis zonas de concentração da cassiterita. Os dados de cargabilidade foram então utilizados para gerar os modelos de visualização 3D, o que possibilitou determinar a morfologia e a continuidade da provável zona de ocorrência da cassiterita.

Outro exemplo de reconhecimento de reservas mineirais pode ser encontrado em Camaquã, onde o método geofísico da eletroresistividade foi aplicado para verificar a ocorrência de carbonatos [77]. A área investigada está inserida na bacia sedimentar do Camaquã, formada por um conjunto de unidades estratigráficas sedimentares e vulcanogênicas. Os perfis elétricos revelaram anomalias circulares de resistividade moderada, atribuídos a zonas com carbonatação. Também foram encontradas anomalias de baixa resistividade que provavelmente indicam concentrações de sulfetos disseminados. Regiões adjacentes de alta resistividade foram associadas a silicificação.

Observa-se que os trabalhos citados foram desenvolvidos principalmente em Caçapava do Sul (ou em municípios próximos), onde existe um campus da UNIPAMPA (Universidade Federal do Pampa), que oferece cursos como geologia, geofísica e engenharia ambiental. Isso explica a concentração de estudos aplicados nessas áreas e sugere a importância da presença da academia para o desenvolvimento regional.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão mostrados os materiais e métodos utilizados para se atingir os objetivos do presente estudo. Basicamente,o método desenvolve-se em três etapas, que ocorrem antes, durante e após o trabalho de campo e possuem a mesma relevância para o desempenho global da pesquisa.

Conforme mostra o esquema da Figura 4.1, na fase pré-campo delimita-se a área de interesse e se analisa previamente perfis litológicos de poços localizados dentro dessa área, cujos pontos selecionados são, então, georreferenciados. Todo o aparato experimental necessário para as atividades em campo é providenciado e preparado, o que inclui a confecção das tabelas para coleta dos dados geoelétricos.



Figura 4.1 Esquema demonstrativo das etapas de pré-campo, campo e pós-campo, que compõem a metodologia aplicada.

A Figura 4.1 mostra ainda informações das etapas de campo e pós-campo. Faz parte do trabalho de campo visitar os locais de interesse para uma análise prévia da viabilidade de se realizar os levantamentos geofísicos nos terrenos. Uma vez selecionadas as áreas, passa-se para a aquisição dos dados de resistividade elétrica. Na fase pós-campo, os dados coletados são processados e passam pela inversão, obtendo-se, assim, os perfis elétricos a serem interpretados e comparados com dados dos poços. A seguir, cada etapa da metodologia aplicada e esquematizada na Figura 4.1 será explicada minunciosamente.

4.1. Delimitação da área de interesse

Ao analisar os números contidos na Tabela 3.2, percebe-se que para se alcançar camadas litológicas profundas com o método da eletrorresistividade, seria necessário executar levantamentos geofísicos com linhas de investigação extensas, o que aumenta o tempo de aquisição de dados e a dificuldade de se encontrar um terreno adequado à prática experimental, conforme ainda será discutido nesse capítulo. Assim, no ano de 2016, foram delimitadas as áreas de interesse, preferindo-se regiões que fazem parte da zona de recarga do Sistema Aquífero Guarani no estado do Rio Grande do Sul.

Outro fator considerado na seleção dos municípios a serem estudados é a demanda de água, devido ao plantio extensivo e criação de gado, atividades que exigem recursos hídricos em elevada escala, para irrigação e dessedentação animal. Foram inclusas também áreas que abrangem conglomerados urbanos, onde a necessidade de água é de extrema relevância para o desempenho de todas as atividades humanas.

Assim, entre abril de 2017 e julho de 2018, foram realizadas saídas de campo e medidas de resistividade elétrica nos municípios de Santa Cruz do Sul, Alegrete e Candelária, além dos municípios de Agudo, Dona Francisca, Faxinal do Soturno e Nova Palma, que pertencem a Região da Quarta Colônia de Imigração Italiana. Compôs a equipe de campo um grupo multidisciplinar, incluindo físicos, químicos, geólogo, doutorandos e bolsistas de iniciação científica do curso de geofísica da



PUCRS, que fazem parte do GIGA (Grupo Interdisciplinar de Geofísica da PUCRS). Os referidos locais estão demarcados no mapa da Figura 4.2.

Figura 4.2 Mapa do Rio Grande do Sul, onde está demarcada a região da Quarta Colônia e os municípios de Santa Cruz do Sul, Candelária e Alegrete, locais onde foram realizados os levantamentos geofísicos.

4.2. Análise de dados de poços e georreferenciamento

Uma vez escolhidos os municípios alvo, foram pesquisados perfis geológicos de poços fornecidos pelo CPRM – Serviço Geológico do Brasil, através da base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS [81] ou da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS [82]. O

SIAGAS é composto por uma base de dados de poços permanentemente atualizada por pesquisas na área de hidrogeologia em todo o país e a RIMAS apresenta resultados do monitoramento contínuo dos poços. Um perfil geológico (ou litológico) do poço fornece a descrição das diferentes camadas encontradas em subsuperfície de acordo com a profundidade. Na base de dados do SIAGAS [81] e da RIMAS [82] é possível ainda verificar informações de análises químicas de amostras de água, entre elas a resistividade elétrica ρ (em Ω .m).

Alguns poços utilizados para o abastecimento de água de cada uma das regiões de interesse foram eleitos. Preferiu-se os perfis com a presença de diferentes camadas em profundidades rasas (até cerca de 20 metros), que pudessem ser estudadas com o método da resistividade elétrica. Os pontos onde se encontram tais poços foram georreferenciados como o auxílio do *software* ArcGis, que conta com um Sistema de Informação Geográfica, do inglês *Geographic Information System* (GIS), para criar e trabalhar com mapas e informações geográficas.

Foi analisada também a disponibilidade de terreno para a execução do levantamento geofísico. Para tanto, é necessário que haja espaço suficiente, correspondente ao comprimento da linha de investigação, e possibilidade de acoplamento dos eletrodos ao terreno, ou seja, o solo não pode ser rochoso, estar revestido por asfalto ou pedra, também não pode estar extremamente seco nem alagado. Tais características podem se transformar em um curto intervalo de tempo e nem sempre são reveladas no georreferenciamento, e por isso deve ser feita uma análise prévia *in loco*, durante o trabalho de campo.

Analisou-se ainda a viabilidade de se chegar seguramente às localidades onde se encontravam alguns dos poços de interesse, já que alguns pontos eram longínquos e sem sinalização. Desse modo, considerou-se a possibilidade, ou não, de contar com a ajuda das equipes das prefeituras municipais, da EMATER (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural) e da CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), que normalmente conhecem os caminhos e pequenas estradas que levam diretamente aos locais onde se desejava realizar a coleta de dados.
4.3. Descrição do aparato experimental

Para executar os levantamentos elétricos em campo, utilizou-se um medidor de resistividade elétrica, conhecido na área de geofísica como eletrorresistivímetro. Os resistivímetros devem ser capazes de ler níveis baixos de resistência elétrica, comumente encontrados nos levantamentos geofísicos. Geralmente, tais equipamentos empregam corrente alternada de baixa frequência, adequadas para superar o efeito das correntes telúricas, de origem natural, que fluem paralelamente à superfície da Terra e causam gradientes de potencial. A profundidade de penetração diminui com o aumento da frequência, que deve ficar entre 1 e 100 Hz. Os eletrorresistivímetros não costumam empregar corrente contínua, uma vez que, assim, o efeito de polarização eletrolítica pode se manifestar, como resultado da migração de cargas devido ao campo elétrico aplicado constantemente [23, 41, 43].

No presente trabalho foi empregado um equipamento do modelo X5xtal Control, do fabricante Autoenergia, conforme mostra a fotografia inserida na Figura 4.3.

O equipamento possui massa de aproximadamente 3 kg, 28 cm de comprimento, 25,5 cm de largura e 13 cm de altura e está montado em uma caixa em forma de maleta, que facilita o transporte e o manuseio em campo. A potência nominal (RMS) é de 168 Watts e a potência de pico (PMPO) é de 504 Watts. O conversor CC possui entrada de tensão de 11 V a 14 Vdc e saída de tensão de 0 a 400 VCC, ± 2000 Vcc Pico. É composto por um módulo dotado de conversor CC/CC pulsador, com duas entradas tipo RCA para voltímetro e amperímetro. Foram utilizados, no caso, dois multímetros digitais da marca Minipa, modelo ET-2550, um destinado à leitura da corrente elétrica (da ordem de mA), e outro à leitura da diferença de potencial (da ordem de mV). Os eletrodos de corrente são chamados de A e B; e os eletrodos de potencial são chamados M e N. Ambos são conectados ao eletrorresistivímetro pelas entradas identificadas com as respectivas letras.

Os comandos manuais consistem em uma chave liga-desliga, sistema de ajuste de tensão e botão de pulso. A chave liga-desliga apresenta indicação verde do LED quando o equipamento está ligado e vermelha quando a bateria se encontra

com carga baixa ou descarregada. O sistema eletrônico de ajuste de tensão de saída consiste em um botão giratório que varia de 0% a 100%. O botão de pulso de tensão possui sistema interligado de leitura e indicador LED vermelho enquanto é pressionado para efetuar as medições.



Figura 4.3. Figura ilustrativa do aparato experimental utilizado para os levantamentos geofísicos, incluindo o eletrorresistivímetro modelo X5xtal Control da Autoenergia, multímetros Minipa, bateria 12 V, eletrodos e cabos A, B, M e N.

Como dispositivos de proteção, o equipamento conta com fusível de sobrecarga na saída de 6 A, proteção de carga baixa da bateria, frequência de resposta de cerca de 0,6 Hz, proteção de inversão de polaridade da bateria,

descarga automática de tensão AB (referente aos cabos de corrente elétrica) ao soltar o botão de pulso e proteção de curto-circuito na saída.

Durante os levantamentos geofísicos realizados em campo, o equipamento foi alimentado por uma bateria de 12 volts e 48 Ah, do fabricante Bosch, utilizada comumente em veículos automotores. A conexão foi feita através de dois conectores banana-jacaré. Um esquema completo do aparato experimental empregado em campo para os levantamentos geofísicos pode ser observado também na Figura 4.3, e será explicado detalhadamente a seguir.

Os eletrodos utilizados em campo devem ser de material condutor e nesse caso foram utilizadas até 21 estacas de Cobre (Cu) de formato cilíndrico, com 1 m de comprimento e 13 mm de diâmetro cada. A quantidade exata de eletrodos empregada no levantamento geoelétrico dependente do comprimento da linha de investigação e do espaçamento "a". O acoplamento com o solo foi feito enterrando-se cerca de 10 cm da estaca, evitando-se abrir buracos maiores do que sua área durante a perfuração, para que o contato com o solo permaneça firme. Nos casos em que o terreno encontra-se muito seco, é recomendado umedecer a região [45], com a finalidade de aumentar a condução de corrente elétrica. Esse procedimento irá saturar o solo apenas em uma profundidade de até 2 cm, ou seja, não irá interferir na coleta de dados e no resultado do experimento [43].

A conexão do eletrorresistivímetro com os eletrodos foi feita por cabos de cobre. Em uma das extremidades de cada cabo foi conectado um borne metálico para se fazer o contato elétrico com o eletrodo. Na outra extremidade foi instalado um conector do tipo banana, compatível com as entradas A, B, M e N do eletrorresistivímetro. Foram utilizados 4 carretéis de fios, todos com 4 mm de diâmetro e 100 metros de comprimento, sendo que a manutenção das mesmas dimensões para todos os fios evitou a necessidade de uma calibração prévia. A Figura 4.4 mostra o aparato experimental descrito, montado em campo durante a aquisição de dados geoelétricos. Observa-se na linha de investigação os eletrodos, e a presença do poço próximo à linha.



Figura 4.4. Aparato experimental em uma situação real de campo, mostrando o eletrorresistivímetro, fios de cobre conectados aos eletrodos, a operadora do equipamento e um poço próximo à linha de investigação.

Para a montagem do aparato experimental fez-se uso de marretas ou martelos para auxiliar no acoplamento dos eletrodos com o solo e trenas para medidas da linha de investigação, que é montada no terreno dispondo-se em linha reta os eletrodos (estacas de cobre), conforme pode ser visto na Figura 4.4. Como o arranjo utilizado neste trabalho é o dipolo-dipolo, mantém-se entre os eletrodos o mesmo espaçamento, que deve ser previamente definido.

Conexões são invariavelmente danificadas durante as atividades. Assim, é imprescindível para o bom andamento das tarefas em campo, portar algumas ferramentas como: chave de boca, alicates, estilete, descascador de fio, tesoura, chaves de fenda, conectores extras e pilhas reserva. Alguns materiais de escritório também são levados, bem como as tabelas de campo, mapas, rádios de comunicação e dispositivo GPS.

Em caso de chuva forte ou descargas elétricas naturais, as atividades são suspensas, com o objetivo de preservar a integridade dos equipamentos e a segurança das pessoas envolvidas, e até mesmo de animais soltos no campo. Salienta-se a importância de se conferir atentamente todo o aparato antes da saída de campo, uma vez que a ausência de qualquer material ou dispositivo pode comprometer o dia de trabalho, pois em muitos casos obter tal instrumento pode ser impossível em tempo hábil, devido à distância de alguns pontos de investigação de centros comerciais urbanos.

4.4. Aquisição de dados de resistividade elétrica

O eletrorresistivímetro X5xtal Control possui dois canais para a conexão de cabos referentes aos eletrodos de diferença de potencial, mais dois canais para os eletrodos de corrente. Dessa maneira, 4 cabos são suportados pelo equipamento, que por essas caracterísiticas consiste em um instrumento simples. O manual do usuário não apresenta instruções detalhadas sobre a montagem do aparato experimental ou a movimentação dos eletrodos para se realizar os levantamentos geoelétricos, mas indica a necessidade dos 4 cabos como material extra para a execução dos levantamentos.

Como base nessas informações, para o arranjo dipolo-dipolo os dados são adquiridos da seguinte maneira: conecta-se no eletrorresistivímetro os quatro cabos que serão utilizados durante a aquisição (dois para a corrente elétrica – entradas A e B – e dois para a diferença de potencial – entradas M e N); conecta-se esses cabos nos quatro primeiros eletrodos do arranjo, instalados na linha de investigação, dispondo-os na mesma ordem das entradas A, B, M e N. O botão de pulso do equipamento é acionado e obtém-se uma medida de corrente elétrica e outra de diferença de potencial, que podem ser visualizadas nos respectivos multímetros. Para cada ponto de medida, efetua-se um total de três medidas, para posteriormente se calcular a média simples entre elas; move-se os cabos de diferença de potencial para os próximos eletrodos, realizando novamente 3 medidas no ponto; repete-se o procedimento até completar o caminhamento elétrico.

A Figura 4.5 mostra a primeira página da tabela para coleta de dados de resistividade elétrica em campo. No cabeçalho, registram-se informações tais como a data do levantamento, localização (que pode ser identificada, por exemplo, pelas coordenadas do poço, ou pelo nome da localidade), horário do início e do fim do levantamento, tipo de arranjo empregado (dipolo-dipolo, nos casos estudados), comprimento "L" da linha de investigação, espaçamento unitário "a" entre os eletrodos, quantidade de eletrodos empregada, fator geométrico "k" – que diz respeito ao arranjo de eletrodos, equipamento, potência, número de níveis de investigação e outras informações relevantes, se houver.

Em seguida, após o cabeçalho, tem-se uma tabela com 12 colunas. Na primeira e na segunda coluna tem-se a posição A e B dos eletrodos de corrente elétrica na linha de investigação. Na terceira e na quarta coluna tem-se a posição M e N dos eletrodos de diferença de potencial. Essas informações são pré-estabelecidas de acordo com o comprimento da linha de investigação e do espaçamento entre os eletrodos e, portanto, já devem estar preenchidas antes da saída de campo. Algumas possibilidades de arranjos são previstas, como por exemplo, de 50 m, 85 m e 100 m, e as respectivas tabelas são levadas para campo.

Nas colunas seguintes, os espaços estão vazios e devem ser preenchidos com informações adquiridas em campo. Na quinta coluna é registrado o potencial espontâneo inicial SP₀, da ordem de mV. As próximas colunas são dedicadas ao registro dos valores de corrente elétrica e de diferença de potencial mensurados. Os valores de i₁, i₂ e i₃ referem-se às três medidas de corrente elétrica, em mA. Os valores de ddp₁, ddp₂ e ddp₃ são referentes às três medidas de diferença de potencial espontâneo, em mV. Na última coluna é registrado novamente o valor do potencial espontâneo, em mV, representado agora por SP₁.

As demais páginas da tabela de desenvolvimento de campo consistem na continuidade da página 1. São adicionadas as demais posições em que devem estar os eletrodos de corrente e de potencial durante as medidas, até a execução completa do arranjo. Por exemplo, para uma linha de investigação de 100 m de comprimento, com espaçamento entre os eletrodos de 5 m, empregando-se o

arranjo dipolo-dipolo, são 143 o número de pontos a serem medidos, que multiplicando-se por 8 (3 medidas para corrente elétrica, somadas a 3 medidas de ddp e 2 de potencial espontâneo), totalizam 1.144 medidas para um único levantamento geoelétrico.

ata	a:			/	Loca	lização:						
lor	a de i	nício	:					Hora d	o fim:			
rra	njo: I	DIPO	LO-D	IPOLO	Fator geor	métrico	: k = π	n (n+1) (r	n+2) a			
·: _		a:	-	Quant	idade de e	eletrodo	os:	Níve	eis de investig	ação:	Potência	:%
qu	ipam	ento:	Resi	sitivimetro	X5tal Cor	ntrol Au	ito Ene	ergia				
DS	ervaç	oes:										
A	В	Μ	Ν	SP ₀ [mV]	i1 [mA]	ddp1	[mV]	i2 [mA]	ddp2 [mV]	i3 [mA]	ddp3 [mV]	SP ₁ [mV]
0	5	10	15									
0	5	15	20									
0	5	20	25									
0	5	25	30									
0	5	30	35									
0	5	35	40									
)	5	40	45									
0	5	45	50									
0	5	50	55									
0	5	55	60									
)	5	60	65									
5	10	15	20									
5	10	20	25									
5	10	25	30									

Figura 4.5. Tabela para coleta de dados de eletrorresistividade em campo, onde são registrados os dados necessários para a construção do perfil geoelétrico.

Para executar o levantamento da maneira descrita, é indispensável uma equipe de pelo menos 3 pessoas constantemente dedicadas à tarefa. Uma delas irá manusear o equipamento, conforme mostrado na Figura 4.4. Tal tarefa consiste em operar os comandos manuais do equipamento, como o botão de pulso e a chave liga-desliga, fazer a tomada dos dados e anotá-los nas tabelas de campo, certificar-se constantemente da correta conexão dos cabos ligados aos eletrodos e garantir que a bateria e os multímetros estejam satisfatoriamente carregados e conectados durante o dia todo de trabalho. As duas outras pessoas envolvidas serão responsáveis por mover os eletrodos ao longo da linha de investigação, sob a orientação do operador do equipamento, que assim é responsável pelo funcionamento geral do aparato experimental e pela correta aquisição dos dados.

Para um levantamento geoelétrico com os parâmetros descritos anteriormente (com um total de 1.144 medidas), gasta-se pelo menos um dia todo de trabalho, não sendo possível na maioria dos casos completar o arranjo antes do pôr-do-sol. Essa limitação foi constatada ao se realizar os primeiros levantamentos geofísicos utilizando o eletrorresistivímetro X5xtal Control, que ocorreram nas dependências da PUCRS, tanto no campus central de Porto Alegre como no campus Viamão. Tais atividades visavam justamente conhecer o modo de operação do equipamento e seu desempenho em atividades práticas.

As características de simplicidade do equipamento apresentaram-se como fator de baixa eficiência para a execução dos trabalhos em campo e, assim, fez-se necessário otimizar os recursos disponíveis no resistivímetro elétrico modelo X5xtal Control, através do desenvolvimento de um procedimento operacional alternativo, que, conforme será explicado no item 5.1, viabilizou o presente trabalho.

4.5. Processamento e inversão dos dados adquiridos em campo

Uma vez coletados os dados em campo, alguns cálculos aritméticos são necessários para se chegar aos valores de resistividade aparente. Para tanto, os dados foram primeiramente transcritos para uma planilha eletrônica, empregando-se o *software* Excel. A Figura 4.6 mostra um exemplo de uma tabela de campo completamente preenchida, com os cálculos também prontos. Nas treze primeiras colunas da planilha, de "A" a "M", que se encontram na parte superior da Figura 4.6 estão registrados exatamente os resultados anotados durante o levantamento geoelétrico em campo, conforme a tabela da Figura 4.5. A coluna "G" é uma exceção, em que se tem a média aritmética simples entre os valores da coluna "E" e "F", ou seja, o potencial espontâneo SP é a média aritmética entre SP₀, coletado no início da medida, e SP₁, coletado ao final da medida.

Entre as colunas "N" e "V", encontradas na parte inferior da Figura 4.6, tem-se alguns cálculos, cujo detalhamento será dado em seguida. Na coluna "N", tem-se *i* em mA, ou seja, a corrente elétrica média entre i_1 , i_2 e i_3 . Na coluna "O" está a *ddp* em mV, que corresponde à média entre *ddp*₁, *ddp*₂ e *ddp*₃. Na coluna "P" está a diferença de potencial média, reduzida do potencial espontâneo *SP*. Na coluna "Q"

obtém-se a resistividade elétrica de acordo com a Primeira Lei de Ohm, dada pela razão (*ddp-SP*)/*i*. Na coluna "R", tem-se *n*, que é o nível de investigação e varia em uma unidade de acordo com o avanço da medida em profundidade. Na coluna "S", tem-se *k*, que é o fator geométrico para o arranjo dipolo-dipolo. Na coluna "T" calcula-se o *mid-point*, que corresponde ao ponto central entre os 4 eletrodos A, B, M e N nos quais a medida está sendo efetuada, ou seja, é dado por (*B+M*)/2. A coluna "U" registra o espaçamento unitário *a* entre os eletrodos, que no caso do arranjo dipolo-dipolo é constante. Finalmente, na coluna "V" está a resistividade aparente $\rho(a)$, dada pelo produto entre a resistência elétrica R e o fator geométrico *k*.



Figura 4.6. Planilha eletrônica onde são registrados os dados coletados em campo e feitos os cálculos necessários para a construção do perfil elétrico.

Após encontrar os valores de resistividade aparente, são excluídas manualmente as medidas consideradas ruins, ou seja, dados afetados por ruídos [45], o que geralmente abrange valores iguais a zero e valores extremamente elevados [46], como, por exemplo, aquele encontrado na última linha da tabela da Figura 4.6, igual a 66578,83 Ω .m. Cabe destacar que o *software* RES2Dinv possui uma ferramenta destinada especificamente à visualização e seleção de pontos ruins de dados ("*bad data points*") pelo usuário, conforme mostra a Figura 4.7.



Figura 4.7. Exemplo de um "perfil de dados" disponível no *software* de inversão de dados RES2Dinv, onde estão marcadas (em azul) medidas a serem descartadas.

Uma vez efetuados os cálculos que constam na tabela da Figura 4.6, tem-se todas as informações necessárias para o processo de inversão dos dados, que consiste na determinação de um modelo bi-dimensional (2D) da resistividade elétrica em subsuperfície a partir dos dados de resistividade aparente $\rho(a)$ adquiridos nos levantamentos elétricos, considerando também o tipo de arranjo de eletrodos utilizado [83, 84]. Esse modelo 2D é comumente denominado perfil elétrico ou imageamento elétrico.

No presente estudo, cada inversão dos dados coletados em campo foi executada utilizando-se a versão demonstração do *software* Res2Dinv, oferecida gratuitamente no *site* do fornecedor Geotomo Software [85]. Tal ferramenta é amplamente difundida no campo da geofísica, fazendo-se presente em trabalhos que empregam o método da eletrorresistividade em pesquisas científicas no Brasil e no mundo [48-51, 86, 88, 97].

O software Res2Dinv executa a inversão dos dados pelo método dos mínimos quadrados com vínculo de suavidade (do inglês "smoothness constrained least-square method"), capaz de produzir um modelo correspondente a uma representação razoável das estruturas geológicas encontradas em subsuperfície a medida que procura minimizar a diferença entre os valores de resistividade medidos e modelados [89-91].

A leitura de dados pelo *software* Res2Dinv é feita somente a partir de um arquivo eletrônico como extensão .dat, que pode ser facilmente produzido no Bloco de Notas (ou *Notepad*), um editor de texto bastante simples, incluído em todas as versões do sistema operacional *Microsoft Windows*. O Res2Dinv exige ainda uma maneira específica de apresentar esses dados, conforme é exibido na Figura 4.8, e será explicada detalhadamente no próximo parágrafo.

Na primeira linha do arquivo dá-se um nome para o perfil geoelétrico, de livre escolha; na segunda linha deve constar o espaçamento "a" entre os eletrodos, em metros; a terceira linha identifica o tipo de arranjo, que corresponde ao número 3 para dipolo-dipolo; na quarta linha é informada a quantidade de pontos medidos; a quinta linha mostra como as medidas são localizadas ao longo do comprimento da linha de investigação, que corresponde ao "*mid-point*"; na sexta linha deve-se informar se há dados ou não de polarização induzida, onde o número 0 corresponde à ausência desses dados. As linhas seguintes possuem quatro colunas cada, onde constam, respectivamente, para cada medida: "mid-point", "a", "n" e " ρ (a)". Todos os valores negativos da resistividade aparente devem ser transformados em valores positivos para inversão dos dados [46]. No final, deve-se incluir uma sequência de cinco zeros entre vírgulas, sinalizando o término da série de informações.



Figura 4.8. Arquivo eletrônico de extensão .dat, requisito para inversão dos dados geoelétricos adquiridos em campo, através o *software* Res2Dinv.

Através da inversão com o *software* Res2Dinv, os dados do arquivo.dat fornecem finalmente o perfil elétrico da linha de investigação, conforme mostra o

exemplo da Figura 4.9, cujos dados foram coletados no campus da PUCRS e seu conteúdo possui apenas fins didáticos.

Observa-se que são fornecidas três imagens diferentes, relativas a 3 iterações. A iteração 1 traz uma pseudo-seção de resistividade aparente medida. A iteração 2 mostra pseudo-seção de resistividade aparente calculada. Finalmente, a iteração 3 fornece a seção de resistividade do modelo invertido. A interpretação dos dados geoelétricos é feita considerando-se apenas a terceira imagem, que corresponde à última iteração. As iterações anteriores correspondem apenas aos passos necessários para se chegar ao resultado final.



Figura 4.9. Exemplo de imageamento geoelétrico obtido com o *software* Res2Dinv, onde a iteração 1 traz uma pseudo-seção de resistividade aparente medida, a iteração 2 mostra uma pseudo-seção de resistividade aparente calculada e a iteração 3 fornece a seção de resistividade do modelo invertido, utilizada efetivamente na interpretação dos dados geoelétricos.

A versão demonstração do Res2Dinv apresenta diversas limitações. Entre elas, não permite fazer alterações na escala de cores, que varia em cada imageamento, de acordo com a amplitude dos valores de $\rho(a)$ encontrados, dificultando a comparação entre os perfis de diferentes linhas de investigação. Assim, para padronização da escala de cores, é necessário realizar um pósprocessamento com o *software* Surfer, fazendo-se uso do método da triangulação com interpolação linear, que desenha linhas entre pontos de dados para criar triângulos. O método foi escolhido por não extrapolar além dos valores de Z, que no caso correspondem aos valores de $\rho(a)$. Assim, não cria dados e atribui um valor "*NoData*" (sem dados) aos pontos que estão fora dos limites [92], mantendo a forma do imageamento elétrico obtido com o *software* Res2Dinv, já que o objetivo de se utilizar o Surfer é unicamente padronizar a escala de cores.

Durante a inversão com o *software* Res2Dinv, além dos perfis mostrados na Figura 4.9, é gerado um arquivo de extensão .inv, que pode ser visualizado com o Bloco de Notas do *Windows*. Nele constam os resultados da inversão, que são empregados para refazer a imagem no *software* Surfer. Deve-se coletar dentro do arquivo apenas as informações da iteração 3, conforme pode ser visto na Figura 4.10.

Após encontrados e selecionados os dados da iteração 3, os mesmos foram copiados para uma planilha do Excel com 3 colunas, sendo a primeira para o valor da localização em x (em metros), a segunda para profundidade em metros e a terceira para a resistividade em Ω .m, conforme pode ser visto na Figura 4.11. É exatamente nessa ordem de apresentação das informações que a imagem pode ser gerada novamente no *software* Surfer, sendo possível criar uma escala de cores que será usada para todos os perfis elétricos. Assim, viabiliza-se a interpretação dos dados adquiridos em campo e a comparação das linhas de investigação entre si e com quaisquer outros dados disponíveis.



Figura 4.10. Fragmento do arquivo de extensão .inv (gerado pelo *software* Res2Dinv) correspondente à iteração 3, necessário para refazer o imageamento com escala de cores padronizada no *software* Surfer.

					ſ			1		
								*		
						39	15,0000	7,7500	92,7340	
1	- (2i + ∓	Dados pro	Surfer - Microsoft Excel	-		40	20,0000	7,7500	51,0950	
cheiro	Base Inserir	Esquema de Página F	órmulas Dados Rever Ver S	iuplementos 🛆 🄇) — @ :	41	25,0000	7,7500	24,1230	
A A	Calibri	- 11 - = =	😑 📅 Geral 🍷 🗛	anserir *	Σ - 27·	42	30,0000	7,7500	70,5050	
Colar	NI NI	§ • A ∧ ■ =	🗐 🚮 - 🧐 - % 000 Estil	os Eliminar *	3 - AA	43	35,0000	7,7500	68,0490	
-	1 🖽 - 🖾	≫· <u>A</u> · 详详	₩·· ,00 ,00 ·· ·	Formatar *	2.	44	40,0000	7,7500	71,7110	
ea de Tr	Tipo c	de Letra 😰 Alinha	mento 🕫 Número 🕼	Células	Edição	45	45,0000	7,7500	147,6000	
	018	• (*]x				46	50,0000	7,7500	181,3200	
1.00	A	Bushinglidede	C	DE	F	47	55,0000	7,7500	274,1200	
LOC	alização	Profundidade	Resistividade		i	48	60,0000	7,7500	282,4100	
er	n x (m)	(m)	(Ω.m)			49	65,0000	7,7500	395,4800	
	10,0000	2,5000	247,9200			50	70,0000	7,7500	674,4900	
	15,0000	2,5000	213,0100			51	75,0000	7,7500	827,0500	
	20,0000	2,5000	752,4400			52	80,0000	7,7500	825,8700	
	25,0000	2,5000	651,2100			53	85,0000	7,7500	1025,7000	CAMADA
	30,0000	2,5000	957,0700			54	90,0000	7,7500	387,8700	
	35,0000	2,5000	547,6500			55	20,0000	10,7750	52,9750	
	40,0000	2,5000	522,7900			56	25,0000	10,7750	13,1020	
2	45,0000	2,5000	615 7600			57	30,0000	10,7750	25,2200	
	55,0000	2,5000	818,7000			58	35,0000	10,7750	27,8520	
	55,0000	2,5000	746 4900			59	40,0000	10,7750	25,8130	
	65,0000	2,5000	827,4900			60	45,0000	10,7750	15 4520	
	70,0000	2,5000	586.0800			61	55,0000	10,7750	15,4520	
	75,0000	2,5000	660,1800			63	60,0000	10,7750	15,5000	
7	80,0000	2,5000	785 5800			65	65,0000	10,7750	17 8050	
2	85.0000	2,5000	804,5800			65	70,0000	10,7750	96 3420	
2	90.0000	2,5000	818,4100	and the second		65	75,0000	10,7750	367 3700	
)	95,0000	2,5000	600,7700	CAMA	ADA 1	67	80.0000	10,7750	456.8300	
	15,0000	5,000	127,4000			68	85,0000	10,7750	381,9000	CAMADA
3	20.0000	5,000	226,4000			69	25,0000	14,1025	54,6740	
1	25,0000	5,0000	236,7700			70	30,0000	14,1025	35,2280	
5	30,0000	5,0000	730,3100			71	35,0000	14,1025	30,9100	
5	35,0000	5,0000	293,5600			72	40,0000	14,1025	29,5260	
7	40,0000	5,0000	450,8800			73	45,0000	14,1025	16,5750	
8	45,0000	5,0000	633,7300			74	50,0000	14,1025	6,2102	
)	50,0000	5,0000	625,5900			75	55,0000	14,1025	4,2155	
0	55,0000	5,0000	827,5000			76	60,0000	14,1025	3,9303	
	60,0000	5,0000	746,1200			77	65,0000	14,1025	4,4056	
2	65,0000	5,0000	792,9400			78	70,0000	14,1025	4,2461	
1	70,0000	5,0000	688,1400			79	75,0000	14,1025	24,2250	CAMADA
6	75,0000	5,0000	817,6900		ł	80	80,0000	14,1025	44,4700	CAIVIADA
	80,0000	5,0000	818,6200			81	30,0000	17,7000	1136,3000	
5	85,0000	5,0000	1001,5000			82	35,0000	17,7000	3018,3000	
	90,0000	5,0000	958,2200	CAMA	DA 2	83	40,0000	17,7000	3281,0000	
	95,0000	5,0000	331,9900	CRIVIE		84	45,0000	17,7000	3001,6000	
						85	50,0000	17,7000	1988,2000	
			L			86	55,0000	17,7000	700,2600	
						87	60,0000	17,7000	188,5000	
						88	65,0000	17,7000	50,1320	CAMADA
						89	70,0000	17,7000	48,5470	CANADA
						14 4 2	H Folha1 Folha2	Folha3	14	

Figura 4.11. Dados da iteração 3 extraídos do arquivo .inv e organizados conforme os moldes do *software* Surfer, para construção do perfil elétrico em escala de cores padronizada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados e discutidos neste capítulo os principais resultados obtidos no presente trabalho. O primeiro resultado relevante foi o desenvolvimento de um procedimento alternativo de aquisição de dados em campo, que permitiu o levantamento dos dados geofísicos de maneira eficaz. Assim, serão apresentados também os perfis geoelétricos das regiões estudadas, que serão analisados em associação com dados hidrogeológicos, dados litológicos de poços, dados sísmicos, entre outras informações.

5.1. Procedimento operacional alternativo para aquisição de dados

As técnicas de aquisição de dados de resistividade elétrica vêm apresentando consideráveis avanços ao longo da história, especialmente no que diz respeito ao tempo necessário para o levantamento de dados. O desenvolvimento de resistivímetros multicanais controlados por *software* representam essa evolução, pois acumulam as funções de aquisição, armazenamento e análise de centenas de pontos de dados, tornando-se ideais para trabalhos de campo [19]. Há modelos de resistivímetros que oferecem ainda outras facilidades, como a checagem dos eletrodos, conferindo se estão conectados e devidamente acoplados ao solo antes do início das medidas [93].

Todavia, conforme discutido anteriormente, o eletrorresistivímetro disponível para a pesquisa (modelo X5xtal Control, do fabricante Autoenergia), consiste em um dos equipamentos mais simples do mercado. Mostra-se eficaz para finalidades didáticas, uma vez que todo o processo para obtenção de dados precisa ser feito mediante comandos dos operadores, tornando clara a forma como os arranjos de eletrodos são concebidos e como cada ponto é utilizado para a construção de um perfil elétrico de subsuperfície. Entretanto, para situações reais de campo, os recursos do instrumento apresentam-se poucos eficientes, uma vez que os trabalhos experimentos demandam muito tempo, devido à quantidade restrita de canais. Assim, fez-se necessário desenvolver um procedimento operacional alternativo de aquisição dos dados, com a finalidade de otimizar as funções do resistivímetro elétrico e, assim, reduzir o tempo de aquisição para um mesmo volume de dados.

No procedimento desenvolvido, os dados são adquiridos de acordo com os passos descritos a seguir, considerando-se o arranjo dipolo-dipolo. Conecta-se em cada eletrodo um carretel diferente de fio de cobre. Para tanto, aumentou-se o número de carretéis de 4 para 18. Conecta-se então no eletrorresistivímetro os cabos que estiverem nos quatro primeiros eletrodos do arranjo, lembrando que os dois primeiros são os eletrodos de corrente elétrica (A e B), o terceiro e o quarto correspondem aos eletrodos de diferença de potencial (M e N).

Efetua-se as medidas de potencial espontâneo, diferença de potencial e corrente elétrica, em triplicata, no primeiro ponto, registrando-as na tabela de campo. Então, no eletrorresistivímetro, troca-se os cabos M e N para a próxima posição, mais uma vez adquirindo os dados e fazendo-se os devidos registros. Uma vez tomadas as medidas no último par de eletrodos M e N da linha, será necessário considerar como eletrodos de corrente a segunda e a terceira estaca de cobre, e assim sucessivamente, até completar o arranjo dipolo-dipolo.

A Figura 5.1 mostra um fluxograma que sintetiza os passos necessários para a aquisição dos dados geofísicos durante o presente trabalho, comparando os procedimentos tradicionais (descritos no item 4.4), como o procedimento operacional alternativo desenvolvido. Para um entendimento mais claro e prático das atividades que ocorrem em campo, tem-se na Figura 5.2 uma comparação pictórica entre o procedimento tradicional e o alternativo.



Figura 5.1. Fluxograma mostrando os passos necessários para aquisição de dados de resistividade elétrica em campo, comparando o procedimento operacional tradicional com o alternativo.



Figura 5.2. Comparação pictórica entre o procedimento operacional tradicional e o alternativo, empregados na aquisição de dados de eletrorresistividade em campo.

Dessa maneira, durante o procedimento operacional alternativo, a troca de eletrodos se dá nas entradas do eletrorresistivímetro, através das extremidades dos fios de cobre opostas à conexão com o eletrodo, onde estão os conectores banana. A troca é realizada pelo operador do equipamento e nesse caso cada rolo de fio deve ser identificado em ambas as pontas, de acordo com sua cor e um número, em ordem crescente. Assim, os cabos foram chamados, por exemplo, de "Vermelho 1", "Preto 2", "Verde 3", etc., conforme é informado na tabela da Figura 5.3. Para sua correta identificação, são utilizados marcadores permanentes e rolos de fita isolante de cores variadas (amarela, branca, verde, vermelha e preta), que passam a fazer parte do material indispensável em campo.

Caso o número de cabos seja menor que o número de eletrodos, utilizam-se tantos cabos quanto possível para cobrir o maior número de eletrodos. Por exemplo, num arranjo com L = 100 metros e a = 5 metros, são acoplados ao solo 21 eletrodos. Porém, há apenas 18 carretéis. Num caso como este, os primeiros cabos do arranjo devem ir para o final da linha de investigação assim que não forem mais utilizados.

O procedimento operacional alternativo agiliza todo o processo sem qualquer prejuízo à qualidade dos dados coletados. Após a montagem do aparato experimental, apenas a permanência do operador do equipamento se fará necessária durante toda a aquisição, pois a troca constante de fios entre os eletrodos (estacas de cobre) é eliminada, e os comandos são centralizados no eletrorresistivímetro.

Apesar das vantagens mencionadas, o procedimento operacional alternativo desenvolvido cria uma necessidade de maior organização e detalhamento na etapa de pré-campo, especialmente no que tange à elaboração das tabelas de campo e coleta de dados. Para efetuar corretamente as trocas dos eletrodos ao longo da linha de investigação e garantir o sucesso da aquisição, é imprescindível compreender a lógica de concepção do arranjo e dominar a posição de cada cabo a todo o momento.

Em relação ao que consta na Figura 4.5, foram adicionados detalhes nas tabelas de campo, com informações precisas a respeito de cada conexão dos eletrodos de corrente elétrica e da ddp, às entradas A, B, M e N do eletrorresistivímetro. De modo complementar, é preciso manter uma ordem préestabelecida dos diferentes fios nos eletrodos ao longo do arranjo, conforme está registrado na Figura 5.3, que mostra a primeira página da nova tabela de campo. Na Figura 5.4 tem-se a segunda página da nova tabela, onde pode ser observado o detalhamento da posição de cada cabo em cada medida.

Com as melhorias metodológicas descritas, o tempo de aquisição dos dados em campo caiu de cerca de 10 horas para aproximadamente 3 horas, considerandose o arranjo dipolo-dipolo e uma linha de investigação de 100 metros de comprimento, espaçamento "a" de 5 m, o que envolve 1.144 medidas, conforme visto anteriormente. Ocorreu também uma diminuição na quantidade de recursos humanos para a execução do trabalho, lembrando que cada membro da equipe de campo também gera um incremento ao custo para a operação, referente a transporte, alimentação e hospedagem.

Data	a://			
Loca	alização:			
Hor	a de início:		Hora do fi	m:
Arra	njo: DIPOLO-DIPOL	.0	L:	a:
Qua	ntidade de eletrodo	os:	Fator geomét	rico: k = π n (n+1) (n+2) :
Equ	ipamento: Resisitivi	ímetro Xta	Control Auto	Energia
Pote	ència:	%	Níveis de inve	estigação:
Obs	ervações:			
Ord	em dos eletrodos:			
Ord	em dos eletrodos:			
Ord	em dos eletrodos: VERMELHO 1	55	VERDE 4	1
Ord 0 5	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2	55 60	VERDE 4 AZUL 1]
Ord 0 5 10	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3	55 60 65	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2	
Ord 5 10 15	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4	55 60 65 70	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3	
Ord 5 10 15 20	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4 PRETO 1	55 60 65 70 75	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3 BRANCO 1	
Ord 5 10 15 20 25	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4 PRETO 1 PRETO 2	55 60 65 70 75 80	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3 BRANCO 1 BRANCO 2	
Ord 5 10 15 20 25 30	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4 PRETO 1 PRETO 2 PRETO 3	55 60 65 70 75 80 85	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3 BRANCO 1 BRANCO 2 AMARELO 1	
Ord 5 10 15 20 25 30 35	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4 PRETO 1 PRETO 2 PRETO 3 PRETO 4	55 60 65 70 75 80 85 90	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3 BRANCO 1 BRANCO 2 AMARELO 1	
Ord 5 10 15 20 25 30 35 40	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4 PRETO 1 PRETO 2 PRETO 3 PRETO 4 VERDE 1	55 60 65 70 75 80 85 90 95	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3 BRANCO 1 BRANCO 2 AMARELO 1	
Ord 5 10 15 20 25 30 35 40 45	em dos eletrodos: VERMELHO 1 VERMELHO 2 VERMELHO 3 VERMELHO 4 PRETO 1 PRETO 2 PRETO 3 PRETO 4 VERDE 1 VERDE 2	55 60 65 70 75 80 85 90 95 100	VERDE 4 AZUL 1 AZUL 2 AZUL 3 BRANCO 1 BRANCO 2 AMARELO 1	

Figura 5.3 Exemplo da primeira página de uma tabela de campo para aquisição de dados de resistividade elétrica.

A	В	M	N	SP ₀ [mV]	i1 [mA]	ddp1 [mV]	i2 [mA]	ddp2 [mV]	i3 [mA]	ddp3 [mV]	SP ₁ [mV]
0	5	10	15								
Vermelho1	Vermelho2	Vermelho3	Vermelho4								
0	5	15	20								2
Vermelho1	Vermelho2	Vermelho4	Preto1								
0	5	20	25								
Vermelho1	Vermelho2	Preto1	Preto2								
0	5	25	30								
Vermelho1	Vermelho2	Preto2	Preto3								
0	5	30	35								
Vermelho1	Vermelho2	Preto3	Preto4								
0	5	35	40								
Vermelho1	Vermelho2	Preto4	Verde1								
0	5	40	45								
Vermelho1	Vermelho2	Verde1	Verde2								
0	5	45	50								
Vermelho1	Vermelho2	Verde2	Verde3								
0	5	50	55								
Vermelho1	Vermelho2	Verde3	Verde4								
0	5	55	60								
Vermelho1	Vermelho2	Verde4	Azul1								
0	5	60	65								
Vermelho1	Vermelho2	Azul1	Azul2								
5	10	15	20								
Vermelho2	Vermelho3	Vermelho4	Preto1								
5	10	20	25								
Vermelho2	Vermelho3	Preto1	Preto2								
5	10	25	30								2
Vermelho2	Vermelho3	Preto2	Preto3								
5	10	30	35								
Vermelho2	Vermelho3	Preto3	Preto4								
										P (con	ágina 2 tinua

Figura 5.4 Exemplo da segunda página da nova tabela de campo para aquisição de dados de resistividade elétrica, mostrando a posição de cada cabo nos eletrodos A, B, M e N.

Diante da necessidade de detalhamento das tabelas de campo, foi desenvolvido, com o apoio da equipe do LASET (Laboratório de Simulação de Escoamentos Turbulentos), inserido na Escola Politécnica da PUCRS, um mecanismo para automatização da confecção das tabelas.

Tal mecanismo permite a criação automatizada das tabelas de campo semelhantes à da Figura 5.3 e Figura 5.4, tendo como dados de entrada o comprimento da linha de investigação (L), o espaçamento mínimo entre os eletrodos (a) e a quantidade de cabos disponíveis. A interface da ferramenta pode ser visualizada na Figura 5.5.

\leftarrow \rightarrow C \triangle \triangleq las	set.lad.pucrs.br/forr	ms.php?form	=280&PHPS	ESSID=47	04c0ku 🍳 🕁	Ś	0	0	:
Сара :::									"
Perfil	Eletrore	esistivida	de > Sa	ídas de	campo				
Eletroresistividade::.									
Saídas de campo		Neve estd		Deman	an antida a da anna a		- de a		
.::Configurações::.	_	Nova sald	a de campo	Kemov	er saldas de campo	marc	adas		
cerrar Sessão	Santa	Cruz do Sul 1	data 19/04/2017	eletrodos 13	niveis de investigação 10		Detalhes		
	Santa	Cruz do Sul 2	19/04/2017	16	9		Detalhes		
	Santa	Cruz do Sul 3	19/04/2020	17	11		Detalhes.		
	Quart	a Colônia 1	25/09/2017	21	11		Detalhes		
	Quart	a Colônia 2	26/09/2017	21	11		Detalhes		
	Quart	ta Colônia 3	27/09/2017	26	11		Detalhes		
	Quart	a Colônia 4	28/09/2017	21	11		Detalhes		
	Quart	a Colônia 5	28/09/2017	17	11		Detalhes		
	Alegn	ete 1	13/03/2018	21	11		Detalhes		
	Alegn	ete 2	13/03/2018	21	11		Detalhes		
	Alegn	ete 3	14/03/2018	21	11		Detalhes		
	Alegn	ete 4	14/03/2018	21	11		Detalhes		
	Alegn	ete 5	15/03/2018	21	11		Detalhes		
	Alegn	ete 6	15/03/2018	21	11		Detalhes		
	Alegn	ete 7	15/03/2018	21	11		Detalhes		
	Cand	elaria 1 (a)	23/07/2018	11	0		Detalhes		
	Cande	elaria 1 (b)	23/07/2018	11	6		Detalhes		
	Cande	elaria Z	24/07/2018	21	11		Detalhes		
	Cande	etaria 3	24/07/2018	17	10		Detaihes		
	Cande	etaria 4	25/07/2018	17	10		Detaihes		
	Cande	etaria o	20/0//2018	17	10		Detaines		

Figura 5.5. Interface da ferramenta para criação automatizada das tabelas de campo.

5.2. Linhas de investigação

No ano de 2017, deu-se início às atividades de campo nas áreas de interesse selecionadas, que compreendem os municípios de Santa Cruz do Sul, Alegrete e Candelária, e ainda a Região da Quarta Colônia, conforme mostra o mapa da Figura 4.2. Cabe ressaltar que no início de tais expedições o procedimento operacional alternativo de aquisição de dados em campo, descrito no item anterior, já havia sido desenvolvido, e foi empregado em todas aos levantamentos geoelétricos.

O método da resistividade elétrica foi aplicado em 21 diferentes linhas de investigação, com comprimento entre 50 e 125 metros, que variou de acordo com a disponibilidade de espaço no terreno e com o tempo disponível para a aquisição dos dados em campo. Na Tabela 5.1 constam informações a respeito de cada uma das

linhas, bem como dados de poços próximos, todos disponíveis no SIAGAS [28], dispostos de acordo com a ordem cronológica dos experimentos.

Cabe salientar que os levantamentos executados em SC3, QC2, AL5a e AL5b ocorreram próximos a poços de prefeituras municipais, controlados pela EMATER; e não foi possível obter o perfil geológico ou quaisquer informações sobre o mesmo. Dessa maneira, foram pesquisados no SIAGAS [81] poços localizados o mais próximo possível de cada uma das linhas de investigação mencionadas. Considerou-se, então, dados dos poços de número de identificação 4300023616 (linha SC3), 4300006571 (linha QC2) e 4300001641 (linhas AL5a e AL5b), conforme registros da Tabela 5.1.

Também é importante observar que, conforme a Tabela 5.1, para algumas linhas de investigação, consta mais de um poço correspondente. Isso ocorre porque os perfis dos poços próximos às linhas CD2, CD3 e CD5, embora estejam disponíveis na base de dados do SIAGAS [81], não apresentaram descrição da litologia das camadas encontradas em subsuperfície. São eles, respectivamente: poço 4300006308, poço 4300006317, poço 4300006321, localizado a apenas 3 m da linha CD5. Dessa maneira, foram consideradas também informações de outros poços próximos, obtidas na base de dados do SIAGAS [81]. São eles: poço 4300025037, que fica a 13 km da linha CD2; poço 4300006327, localizado a 500 m da linha CD3, e poço 4300006306, distante 1,8 km da linha CD5.

Apesar obtenção de dados extras de poços, a correlação entre perfis litológicos e perfis elétricos, quando existe um afastamento significativo entre ambos, deve ser feita observando-se que as variações na geologia, mesmo em subsuperfície, podem acontecer dentro de uma pequena variação no espaço. Portanto, a distância entre a linha de investigação e o poço (DLP), registrada na Tabela 5.1, será levada em consideração na discussão dos resultados do presente trabalho.

	Linha	L (m)	DOI (m)	Zo co	ona UTM e ordenadas poço	Número de Identificação do poço	DLP (m)	<i>ρ</i> ág (Ω.m)	UHL
8	SC1	60	17		N 6715533 E 364175	4300023674	3	27,5	Fr
. CRUZ SUL	SC2 75 16 रि	22J	N 6710358 E 361322	4300023609	2	26,7	Gr		
Sta	SC3	80	16		N 6712446 E 363586	4300023616	2400	-	Fr
-	QC1	100	16		N 6709898 E 284711	4300021299	8	28,6	Gr
/2017	QC2	100	16		N 6734098 E 286536	4300006571	2500	-	Fr
tTA CO mbro/	QC3	125	16	22J	N 6727024 E 271594	4300007744	160	9,4	Gr
QUAR Sete	QC4	80	13		N 6726364 E 264939	4300023461	80	37,0	Gr
	QC5	60	13		N 6737150 E 261060	4300002705	1200	-	Fr
	AL1	100	21		N 6702484 E 619447	4300026139	3	60,4	Fr
	AL2	100	21		N 6700902 E 614202	4300021214	7	16,8	Fr
SRETE /2018	AL3	100	21	n	N 6704772 E 617396	4300024853	750	100,1	Fr
ALEG	AL4	100	21	21	N 6703202 E 620044	4300001349	400	35,6	Fr
	AL5a AL5b	100 100	21 21		N 6699321 E 605872	4300001641	1500	45,4	Fr
	AL6	100	17		N 6702396 E 621440	4300001355	280	46,3	Fr
	CD1a CD1b	50 50	15 15		N 6722806 E 325741	4300006306	60	-	Gr
	CD2	100	17		N 6702908 E 331472	4300006308	90	12,3	Gr
	CD2	100	17		N 6715499 E 328230	4300025037	13000	-	Gr
LÁRIA 2018	(1)	00	17	ſ	N 6715008 E 325493	4300006317	700	33,6	Gr
CANDE Julho/	03	80	17	22	N 6714727 E 325971	4300006327	400	-	Gr
	CD4	80	17		N 6714727 E 325971	4300006327	32	-	Gr
	CDE	00	17		N 6724401 E 324745	4300006321	3	70,4	Gr
	CDS	80	17		N 6722806 E 325741	4300006306	1800	-	Gr

Tabela 5.1. Relação das linhas de investigação onde foram adquiridos os dados de eletrorresistividade.

L=comprimento da linha, DOI=profundidade alcançada no levantamento geofísico, DLP=distância aproximada entre a linha de investigação e o poço, *p*ág=resistividade elétrica da água do poço, e UHL=unidade hidrolitológica, Fr=fraturada, Gr=granular

Nota-se que a profundidade dos poços variou entre 51 a 240 metros, e a profundidade da primeira entrada de água variou de 17,5 a 132 metros, com exceção da linha SC1, que tem sua primeira entrada de água em 7 metros. Como os valores mencionados são maiores que a profundidade alcançada em cada linha de investigação, tornaram-se irrelevantes para a interpretação dos perfis elétricos, e foram suprimidos da Tabela 5.1.

Os pontos onde ocorreram os levantamentos geoelétricos estão localizados entre o rebordo da Serra Geral e a Depressão Central do estado, e foram georreferenciados, conforme mostra a Figura 5.6 (município de Santa Cruz do Sul), a Figura 5.7 (Região da Quarta Colônia, abrangendo os municípios de Agudo, Dona Francisca, Faxinal do Soturno e Nova Palma), a Figura 5.8 (município de Candelária) e a Figura 5.9 (município de Alegrete).



Figura 5.6 Mapa do município de Santa Cruz do Sul mostrando os pontos onde foram realizadas as medidas de eletrorresistividade (linhas SC1, SC2 e SC3). As setas indicam a direção e o sentido das referidas linhas de investigação.



Figura 5.7 Mapa da parte da Região da Quarta Colônia, mostrando os municípios de Nova Palma, Faxinal do Soturno, Dona Francisca e Agudo, onde foram realizadas as medidas de eletrorresistividade (linhas QC1, QC2, QC3, QC4 e QC5). As setas indicam a direção e o sentido das referidas linhas de investigação.

São provenientes de Santa Cruz do Sul (Figura 5.6) os primeiros relatos, dentro do estado do RS, sobre superexplotação de aquíferos, que estão relacionadas com o intenso bombeamento de poços. A cidade está assentada sobre rochas pertencentes aos Grupos Rosário do Sul e São Bento e os poços são capazes de captar água tanto de sedimentos tanto quanto dos basaltos do Sistema Aquífero Serra Geral [17]. Quanto à compartimentação, o município de Santa Cruz do Sul está inserido na zona Central-Missões.

Santa Cruz do Sul é caracterizada pela extensa atividade industrial e, apesar de os estudos sobre o decaimento dos níveis de água subterrâneo no município ainda não serem conclusivos, estima-se um rebaixamento a partir da década de 70, o que ocasionou movimentos sociais, mas também estudos técnicos, que

resultaram no cadastramento e maior controle de perfurações de poços tubulares, servindo de modelo para novas ações em outros municípios do estado [21]. Por esse histórico e características, Santa Cruz do Sul foi o primeiro município alvo do presente trabalho.

Os municípios da Região da Quarta Colônia (Figura 5.7), assim como o município de Candelária (Figura 5.8), também estão localizados no Compartimento Central-Missões.



Figura 5.8 Mapa do município de Candelária, mostrando os pontos onde foram realizadas as medidas de eletrorresistividade (linhas CD1a, CD1b, CD2, CD3, CD4 e CD5). As setas indicam a direção e o sentido das referidas linhas de investigação.

O município de Alegrete (mapa da Figura 5.9) é o único do presente estudo que se encontra no compartimento Oeste. Entre Santana do Livramento, Uruguaiana, Itaqui e Alegrete, o aquífero apresenta as melhores características hidráulicas para captação de águas subterrâneas por poços [17]. Dados de um balanço hídrico realizado na região demonstram que o aquífero é alimentado de março a outubro (os dados foram coletados no mês de abril). Entre novembro e fevereiro o aquífero apresenta balanço hídrico negativo e cede água. Tem seu pico de alimentação nos meses de outono e pico de retirada em novembro [94 *apud* 17].



Figura 5.9 Mapa de parte do município de Alegrete, mostrando os pontos onde foram realizadas as medidas de eletrorresistividade (linhas AL1, AL2, AL3, AL4, AL5a AL5b e AL6). As setas indicam a direção e o sentido das referidas linhas de investigação.

5.2.1. Observações sobre a profundidade de investigação (DOI) alcançada

De acordo com a Tabela 5.1, foram executados levantamentos geofísicos de eletrorresistividade em 21 linhas diferentes, cujo comprimento "L" variou entre 5 e 125 m. A profundidade de investigação alcançada experimentalmente ficou entre 13 e 21 m e, conforme foi visto anteriormente, ela depende fortemente do tipo de

arranjo empregado e de "L", numa proporção de pode ser calculada teoricamente de acordo com a relação matemática da Eq. 3.17, aplicada nos estudos mencionados na Tabela 3.2. Propõe-se uma comparação entre dados teóricos e experimentais.

Através desse conjunto de dados, estabeleceu-se uma comparação entre a profundidade teórica e a profundidade média alcançada experimentalmente durante os trabalhos de campo, onde foi empregado o arranjo dipolo-dipolo. Os resultados dessa análise estão expostos na Tabela 5.2, onde a constante de proporcionalidade "C" é obtida, nesse caso, a partir da razão entre a profundidade média alcançada experimentalmente e "L", e indica a taxa de crescimento da profundidade de investigação com o comprimento da linha de investigação durante os levantamentos geofísicos.

Tabela 5.2. Comparação entre profundidades teóricas e a profundidade média alcançada experimentalmente para os diferentes comprimentos das linhas de investigação; obtenção da constante de proporcionalidade para os dados experimentais.

L (m)	DOI teórica (m), para c = 0,195 [57]	DOI teórica (m), para c = 0,25 [58, 59]	DOI média experimental (m)	c experimental
50	9,75	12,5	15	0,30
60	11,7	15	15	0,25
75	14,6	18,7	16	0,21
80	15,6	20	16	0,20
100	19,5	25	19,2	0,19
125	24,4	31,2	16	0,13

Na Figura 5.10 tem-se os dados da Tabela 5.2 expressos graficamente, com as profundidades em função de "L". As curvas em verde e azul mostram o aumento linear da profundidade de investigação teórica com o comprimento "L" da linha, considerando diferentes estudos [57-59]. Já os pontos em vermelho são referentes aos valores da profundidade alcançada na prática, em campo. A linha pontilhada vermelha mostra uma curva de tendência para os referidos pontos. Nota-se que o ponto vermelho para L=100 m está, aparentemente, desviado da curva, que cresce a uma taxa claramente menor que as curvas teóricas. Entretanto, é possível que o ponto para L=125 m esteja mais distante de expressar a realidade, visto que existe apenas uma linha de investigação para esse comprimento, enquanto que para L=100 m, há 9 dentre as 21 linhas de investigação, o que provoca um deslocamento

da curva para cima, aproximando esse ponto, verificado experimentalmente, da curva azul (de valores teóricos). O valor elevado de R=0,52915 observado na Figura 5.10 também demonstra que o volume de dados relativos às profundidades obtidas em campo é possivelmente insuficiente para se fazer afirmações definitivas sobre a conformidade entre os dados experimentais e valores teóricos.

Os gráfico da Figura 5.11 mostra a relação entre a constante de proporcionalidade C obtida a partir dos dados levantados em campo, com o comprimento da linha de investigação, mostrando na linha pontilhada uma aproximação linear dessa função, onde, arredondando-se os coeficientes, tem-se que

$$c = 0.38 - 0.002L$$

Figura 5.10. Gráfico mostrando a relação entre o comprimento da linha de investigação "L" e a profundidade de investigação, considerando valores teóricos e experimentais.

Como o coeficiente de L é negativo, entende-se que a constante de proporcionalidade c diminui com o aumento do comprimento da linha de investigação L, conforme pode ser visualizado na Figura 5.11.

Eq. 5.1

Assim, fica claro que o ganho em profundidade de investigação é pouco considerável com o aumento de L. Entretanto, na prática em campo, um pequeno incremento em L gera um aumento importante no número de pontos *np* a serem adquiridos durante o levantamento geofísico, conforme mostra o gráfico da Figura 5.12, cuja curva é dada pelo polinômio de segundo grau

$$np = 1 - 0.3L + 0.002L^2$$
 Eq. 5.2

Os pontos na curva indicam os valores de L utilizados para as linhas de investigação executadas no presente trabalho.



Figura 5.11. Gráfico mostrando a relação entre as constantes de proporcionalidade C, verificadas experimentalmente, e o comprimento L da linha de investigação.

Uma vez que o aumento de *np* gera um incremento também no tempo de aquisição dos dados de eletrorresistividade, há um limite onde o aumento de L ainda é vantajoso durante os trabalhos de campo, no sentido experimental e logístico.

A linha azul do gráfico da Figura 5.11 representa a média das constantes de proporcionalidade verificadas experimentalmente, que é igual a 0,21 (valor próximo à média de C estimada teoricamente e registrado na Tabela 3.2, que é igual a 0,23). Assim, pode-se afirmar que a profundidade de investigação está dentro dos valores

esperados teoricamente, especialmente considerando que estudos mostram que, na prática, a profundidade da investigação em qualquer sistema costuma ser bem menor do que geralmente se supõe [57].



Figura 5.12. Gráfico mostrando o aumento do número de pontos *np* a serem medidos em campo, em função do aumento do comprimento L da linha de investigação, para o arranjo dipolo-dipolo.

5.2.2. Desvio padrão das medidas adquiridas

Foi calculado o desvio padrão de cada medida realizada em todas as linhas de investigação. Na Tabela 5.3 tem-se como exemplo os cálculos realizados para a linha SC1, onde foi obtido o desvio padrão para as 3 medidas de corrente elétrica e para as 3 medidas de diferença de potencial. O mesmo cálculo foi repetido para todas as demais linhas de investigação e estão apresentados na Tabela 5.4, onde observa-se que, embora alguns valores do desvio padrão sejam elevados, eles aparecem apenas em alguns pontos, pois os valores médios permanecem baixos. O valor mínimo do desvio padrão encontrado, para todas as medidas de todas as linhas, foi igual a zero.

145 -188 144 -18 144 -18 100 0.58 146 -122 143 -21 147 -22 2.08 0.58 146 10.9 149 10.9 147 11.4 1.53 0.29 147 12.2 146 11.7 147 11.4 0.58 0.40 145 -168 147 -167 145 -168 10.0 0.01 145 -168 147 -5.3 146 -4.9 1.00 0.31 148 66 147 66 146 66 1.00 0.01 148 5.5 147 -5.3 1.40 0.83 1.00 0.83 145 8.4 147 9.1 147 9.1 40 1.53 0.00 148 6.4 177 9.17 14 0.58 0.58 1.73 1.00 168 9.170 150 1.73	i1 [mA]	ddp1 [mV]	i2 [mA]	ddp2 [mV]	i3 [mA]	ddp3 [mV]	DESVIO	DESVIO PADRÃ
145 -188 146 -189 144 -188 1,00 0.58 146 10.9 149 10.9 147 11.4 1.53 0.29 147 12.2 146 11.7 147 11.4 0.58 0.40 146 11.3 147 11.4 0.58 0.40 0.12 145 -168 147 166 146 66 1.00 0.00 148 66 147 66 146 4.9 1.00 0.31 145 8.4 147 9.1 1.15 0.40 0.42 170 -69 169 -68 167 -67 1.53 1.00 168 39 170 39 171 40 0.58 0.58 171 38 171 37 179 173 19 173 19 0.60 0.58 171 38 177 3.1 177 3.1<							PADRAO i (mA)	ddp (mV)
146 -22 147 -22 2.08 0.58 146 10.9 147 11.4 1.53 0.29 147 12.2 146 11.7 147 11.4 0.58 0.40 146 11.3 147 11.4 0.58 0.40 145 -168 147 -167 145 1.15 0.00 148 66 147 66 146 66 1.00 0.00 148 8.4 147 9.1 147 9.1 0.00 0.31 147 -3.4 149 -4 148 -4.2 1.00 0.42 170 69 169 68 167 -67 1.53 1.00 168 39 170 317 138 0.00 0.58 0.758 171 148 171 137 171 38 0.00 0.58 171 147 115 172 12	145	-188	146	-189	144	-188	1,00	0,58
146 10.9 149 11.4 11.53 0.29 147 11.2 146 11.7 11.7 11.4 0.58 0.40 146 11.3 145 11.3 147 11.4 0.58 0.40 148 66 147 66 146 66 1.00 0.01 148 -5.5 147 -5.3 146 -4.9 1.00 0.31 145 8.4 147 9.1 147 9.1 1.15 0.40 147 -3.4 149 -4 148 -4.2 1.00 0.42 170 -69 159 170 15 170 155 0.58 0.58 171 14 171 13 170 14 0.58 0.58 173 11.4 173 11.5 170 156 0.58 0.58 173 11.4 173 11.5 173 19 0.58	146	-22	143	-21	147	-22	2,08	0,58
147 11,2 146 11,3 147 11,4 0.58 0.40 146 11,3 147 11,1 100 0.012 145 -168 147 -167 145 -168 1.15 0.58 148 65 147 -5,3 146 -69 1.00 0.031 145 8,4 147 9,1 147 9,1 0.00 0.31 145 8,4 147 9,1 147 9,1 0.00 0.031 147 -3,4 149 -4 148 -6,2 1.00 0.42 170 -69 -68 167 -67 1.53 1.00 168 39 170 39 171 40 1.53 0.58 171 14 173 1.77 1.14 0.58 0.58 0.58 173 173 1.17 1.15 1.17 1.15 0.58 0.26	146	10,9	149	10,9	147	11,4	1,53	0,29
146 11,3 147 11,1 1.00 0.12 145 -168 147 -167 145 -168 1,15 0,00 148 -5,5 147 -5,3 146 66 1,00 0,00 144 -5,5 147 -5,3 146 -66 1,00 0,01 145 8,4 147 9,1 147 9,1 1,15 0,00 0,42 170 -69 169 -68 167 -57 1,53 1,00 168 59 170 39 171 40 0,58 0,58 171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 173 11,4 173 11,5 173 19 0,00 0,00 173 11,4 173 11,5 173 19 0,00 0,00 173 11,4 173 14,8 174 6,35 0,28 </td <td>147</td> <td>12,2</td> <td>146</td> <td>11,7</td> <td>147</td> <td>11,4</td> <td>0,58</td> <td>0,40</td>	147	12,2	146	11,7	147	11,4	0,58	0,40
145 -168 147 -167 145 -168 1,15 0.58 148 66 147 66 146 66 1.00 0.00 148 5.5 147 -5,3 146 -4.9 1.00 0.31 145 8.4 147 9.1 147 9.1 1.15 0.042 170 -69 169 -68 167 -67 1.53 1.00 168 39 170 39 171 40 1.53 0.58 171 14 171 13 170 14 0.58 0.58 171 15 170 62 170 63 0.00 0.58 173 11,4 173 11,5 172 12 0.58 0.32 173 1,3 177 3,1 177 143 0.58 0.26 188 -41,3 178 -41,8 178 41,7 6,35 <td>146</td> <td>11,3</td> <td>145</td> <td>11,3</td> <td>147</td> <td>11,1</td> <td>1,00</td> <td>0,12</td>	146	11,3	145	11,3	147	11,1	1,00	0,12
148 66 147 66 146 66 1,00 0,00 148 -5,5 147 -5,3 146 -4,9 1,00 0,31 147 -3,4 149 -4 148 -4,2 1,00 0,042 170 -69 169 -68 167 -67 1,53 1,00 168 39 170 39 171 40 1,53 0,58 171 13 170 14 0,58 0,58 0,58 171 -155 170 -156 170 63 0,00 0,58 173 1,4 173 1,9 173 19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 173 19 0,00 0,00 174 3 177 3,1 177 3,1 0,58 0,22 189 -1,13 177 3,1 173 0,58 0,28	145	-168	147	-167	145	-168	1,15	0,58
148 -5,5 147 -5,3 146 -4,9 1,00 0.31 145 8,4 147 9,1 147 9,1 1,15 0,40 147 -3,4 149 -4 148 4,2 1,00 0,42 170 -69 169 -68 167 -67 1,53 1,00 168 39 171 30 171 38 0,00 0,58 171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 173 1,4 173 1,15 172 12 0,58 0,32 173 1,4 173 1,15 172 12 0,58 0,22 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 -41,3 177 3,1 177 3,1 0,58 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 </td <td>148</td> <td>66</td> <td>147</td> <td>66</td> <td>146</td> <td>66</td> <td>1,00</td> <td>0,00</td>	148	66	147	66	146	66	1,00	0,00
145 8,4 147 9,1 1,15 0,40 147 -3,4 149 -4 148 -4,2 1,00 0,42 170 -69 169 -68 167 -67 1,53 1,00 168 39 170 39 171 40 1,53 0,58 171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 171 -155 170 -156 170 -156 0,58 0,58 173 -19 173 -19 173 -19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 178 -41,7 6,35 0,22 189 -41,3 178 -173 173 150 153 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 130 173 -130 153 0,00 0,00 176 <td>148</td> <td>-5,5</td> <td>147</td> <td>-5,3</td> <td>146</td> <td>-4,9</td> <td>1,00</td> <td>0,31</td>	148	-5,5	147	-5,3	146	-4,9	1,00	0,31
147 -3,4 149 -4 148 -4,2 1,00 0,42 170 -69 169 -68 167 -67 1,53 1,00 168 39 170 39 171 40 1,53 0,58 171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 171 -155 170 -155 170 156 0,58 0,58 170 62 170 62 170 63 0,00 0,000 173 1,4 173 11,5 172 12 0,58 0,22 182 -11,5 180 -10,3 179 -97 1,53 0,02 182 -11,5 178 173 14 76 55 0,22 188 -175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 174 24 0,58 0,00 176	145	8,4	147	9,1	147	9,1	1,15	0,40
170 -69 169 -68 167 -67 1,53 1,00 168 39 170 39 171 40 1,53 0,58 171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 171 38 171 37 171 38 0,00 0,58 170 62 170 62 170 63 0,00 0,58 173 11,4 173 11,5 172 12 0,58 0,20 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 -41,3 178 -41,8 178 -41,7 6,55 0,26 178 3 177 13 177 3,1 0,58 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 174 32 174 33 0,58	147	-3,4	149	-4	148	-4,2	1,00	0,42
168 39 170 39 171 40 1,53 0,58 171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 171 138 171 37 171 38 0,00 0,58 170 62 170 62 170 63 0,00 0,58 173 1.4 173 1.5 172 12 0,58 0,32 173 1.4 173 1.5 173 1.9 0,00 0,00 173 5.2 172 4.8 173 5 0,58 0,26 189 -1.5 170 -1.7 1.5 0,00 0,00 0,00 175 63 177 3.1 177 3.1 0,58 0,00 175 63 177 53 174 -33 0,58 0,00 175 -52 174 -32 174 -33 0,58 <td< td=""><td>170</td><td>-69</td><td>169</td><td>-68</td><td>167</td><td>-67</td><td>1,53</td><td>1,00</td></td<>	170	-69	169	-68	167	-67	1,53	1,00
171 14 171 13 170 14 0,58 0,58 171 38 171 37 171 38 0,00 0,58 170 62 170 62 170 63 0,00 0,58 173 11,4 173 11,5 172 12 0,58 0,22 173 1.9 173 19 173 -19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 173 -19 0,00 0,00 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,22 189 41,3 178 -41,6 175 63 0,00 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58	168	39	170	39	171	40	1,53	0,58
171 38 171 37 171 38 0,00 0,58 170 155 170 156 170 156 0,00 0,58 170 162 170 63 0,00 0,58 173 11,4 173 11,5 172 12 0,58 0,32 173 1.9 173 19 173 19 0,00 0,00 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 -41,3 178 -41,7 6,35 0,26 178 0,00 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 175 24 174 24 0,58 0,00 175 23 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 24 175 24 174 24 0,58 0,00	171	14	171	13	170	14	0,58	0,58
171 -155 170 -156 170 -156 0,58 0,58 170 62 170 62 170 63 0,00 0,58 173 11,4 173 11,5 172 12 0,58 0,32 173 -19 173 -19 173 -19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 173 5 0,58 0,20 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,02 178 -3 177 6,15 175 0,58 0,00 175 63 175 63 0,00 0,00 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,00	171	38	171	37	171	38	0,00	0,58
170 62 170 63 0,00 0,58 173 11,4 173 11,5 172 12 0,58 0,32 173 19 173 19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 173 5 0,58 0,20 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 -41,3 178 -41,8 178 -41,7 6,55 0,26 178 3 177 3,1 0,58 0,00 0,00 175 63 175 63 175 63 0,58 0,58 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 198 -101 196 -103 195 -104 0,58 0,00 196 -11,1 196 -109 1,53 0,00 0,58 194 36 193 <td< td=""><td>171</td><td>-155</td><td>170</td><td>-156</td><td>170</td><td>-156</td><td>0,58</td><td>0,58</td></td<>	171	-155	170	-156	170	-156	0,58	0,58
173 11,4 173 11,5 172 12 0,58 0,32 173 -19 173 -19 173 -19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 173 5 0,58 0,20 182 -11,5 180 -10,3 179 9,7 1,53 0,92 189 -41,3 178 -41,8 177 5,1 0,58 0,00 175 63 177 7,50 175 -150 1,53 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 73 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 -43 0,5	170	62	170	62	170	63	0,00	0,58
173 -19 173 -19 0,00 0,00 173 5,2 172 4,8 173 5 0,58 0,20 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 +41,3 178 41,8 178 -117 5,05 0,00 0,00 178 3 177 3,1 177 3,1 0,58 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 -32 174 -32 174 -33 0,58 0,58 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 198 -101 195 -101 1,55 0,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,00 196 -149 195 194 100 0,00 0,58 194	173	11,4	173	11,5	172	12	0,58	0,32
173 5,2 172 4,8 173 5 0,58 0,20 182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 -41,3 178 -41,8 177 -150 0,58 0,06 178 3 177 -150 1,53 0,00 0,00 175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 174 24 0,58 0,00 175 32 174 33 0,58 0,58 198 -101 196 -101 195 -101 1,53 0,00 196 -11,1 196 -10,9 195 -10,9 0,58 0,12 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 193 66 194 61 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192	173	-19	173	-19	173	-19	0,00	0,00
182 -11,5 180 -10,3 179 -9,7 1,53 0,92 189 -41,3 178 -41,8 178 -41,7 6,35 0,26 178 3 177 3,1 177 3,1 0,58 0,00 175 63 175 63 0,00 0,00 175 63 175 63 0,00 0,00 175 63 175 63 0,00 0,00 175 32 174 -32 174 33 0,58 0,58 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 196 -11,1 196 -10,9 195 -10 9 0,58 0,00 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,058 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 195 29 195<	173	5,2	172	4,8	173	5	0,58	0,20
189 -41,3 178 -41,8 178 -41,7 6,35 0,26 178 3 177 3,1 177 3,1 0,58 0,06 178 -150 177 -150 175 -150 1,53 0,00 175 63 175 63 0,00 0,00 175 52 174 -32 174 24 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 24 0,58 0,00 175 -32 174 -32 174 33 0,58 0,58 198 -101 196 -109 195 -101 1,53 0,00 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 <t< td=""><td>182</td><td>-11.5</td><td>180</td><td>-10.3</td><td>179</td><td>-9.7</td><td>1,53</td><td>0,92</td></t<>	182	-11.5	180	-10.3	179	-9.7	1,53	0,92
178 3 177 3,1 177 3,1 0,58 0,06 178 -150 177 -150 175 -150 1,53 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 174 24 0,58 0,00 0,00 175 32 174 -32 174 -33 0,58 0,00 175 32 174 -32 174 -33 0,58 0,58 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 196 -101 195 -109 0,58 0,00 0,00 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192 -52 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192 1,53 0,00 201 <td>189</td> <td>-41.3</td> <td>178</td> <td>-41.8</td> <td>178</td> <td>-41.7</td> <td>6.35</td> <td>0.26</td>	189	-41.3	178	-41.8	178	-41.7	6.35	0.26
178 -150 177 -150 175 -150 1,53 0,00 175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 175 24 174 24 0,58 0,00 175 32 174 -32 174 -33 0,58 0,58 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 196 -101 196 -109 195 -109 0,58 0,00 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 51 193 -52 192 52 1,00 0,58 195 29 194 29 0,58 0,00 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58	178	3	177	3.1	177	3.1	0.58	0.06
175 63 175 63 175 63 0,00 0,00 175 24 175 24 174 24 0,58 0,00 175 32 174 -32 174 -33 0,58 0,58 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 196 -101 195 -100 1,53 0,00 0,00 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 194 51 193 52 192 -52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 <td>178</td> <td>-150</td> <td>177</td> <td>-150</td> <td>175</td> <td>-150</td> <td>1.53</td> <td>0.00</td>	178	-150	177	-150	175	-150	1.53	0.00
1751751751741741240,080,00175-32174-32174-330,580,58176-19173-19173-181,730,58198-101196-101195-1011,530,00196-11,1196-10,9195-10,90,580,12196-149194-149194-1491,000,001956519465193661,000,581943619337192371,000,58194-51193-52192-521,000,581952919529194290,580,00201-52200-51199-511,000,5819872196-66195-671,530,58198-67196-66195-671,530,58197-27196-27195-271,000,00205-194203-194202-1931,530,582047720277203721,002,89203-31201-30200-311,530,582047720277203731,002,89203-31201-30200-311,530,58<	175	63	175	63	175	63	0.00	0.00
175121751751751741230,580,58176-19173-19173-181,730,58198-101196-101195-1011,530,00196-11,1196-10,9195-10,90,580,12196-149195-149194-1491,000,001956519465193661,000,581943619337192371,000,58194-51193-52192-521,000,581952919529194290,580,00201-52200-51199-511,000,581987219772195721,530,001974319643196430,580,00198-67194203-194202-1931,530,582027420275201740,580,582047720277203721,002,89203-31201-30200-311,530,582047720277203721,002,89203-31201-33197-340,582,08198-95197-94197-950,580,58<	175	24	175	24	174	24	0.58	0.00
175 0.2 173 19 173 18 1,73 0,53 176 -19 173 -19 173 -18 1,73 0,58 198 -101 196 -10,9 195 -10,9 0,58 0,12 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 194 51 193 -52 192 52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,58 198 -67 196 -66 195 -67 1,53	175	-32	174	-32	174	-33	0.58	0.58
198 -101 196 -101 195 -101 1,53 0,00 196 -11,1 196 -109 195 -109 0,58 0,12 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192 -52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 <	176	-19	173	-19	173	-18	1 73	0,58
196 -101 196 -10.9 195 -10.9 $0,58$ $0,12$ 196 -11.1 196 -10.9 195 -149 $0,58$ $0,12$ 196 -149 195 -149 194 -149 $1,00$ $0,00$ 195651946519366 $1,00$ $0,58$ 194361933719237 $1,00$ $0,58$ 194-51193 -52 192 -52 $1,00$ $0,58$ 195291952919429 $0,58$ $0,00$ 201 -52 200 -51 199 -51 $1,00$ $0,58$ 200 -158 198 -157 198 -158 $1,115$ $0,58$ 198721977219572 $1,53$ $0,00$ 198 -67 196 -66 195 -67 $1,53$ $0,58$ 197 -27 196 -27 195 -27 $1,00$ $0,00$ 205 -194 203 -194 202 -193 $1,53$ $0,58$ 204772027720372 $1,00$ $2,89$ 203 -31 201 -30 200 -31 $1,53$ $0,58$ 204772027720372 $1,00$ $2,89$ 203 -31 201 -30 200 -31 $1,53$ $0,58$ 204772027720372 $1,00$ <	198	-101	196	-101	105	-101	1,73	0,00
190 -11,1 190 -10,5 193 -10,5 0,35 0,12 196 -149 195 -149 194 -149 1,00 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192 -52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53	106	-101	106	-101	195	-101	1,55	0,00
195 143 194 144 144 145 160 0,00 195 65 194 65 193 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0	190	-11,1	105	-10,9	195	-10,9	1.00	0,12
195 65 194 65 195 195 66 1,00 0,58 194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192 -52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 51 1,00 0,58 200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 0,017 198 0,016	190	-149	195	-149	102	-149	1,00	0,00
194 36 193 37 192 37 1,00 0,58 194 -51 193 -52 192 -52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 203 -31 201 -30 200 -31 1,53	195	05	194	05	195	00	1,00	0,58
194 -51 193 -52 192 -52 1,00 0,58 195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 204 77 202 75 201 74 0,58 0,58 203 -31 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 33 0,5	194	50	193	57	192	57	1,00	0,58
195 29 195 29 194 29 0,58 0,00 201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 33 0,58 </td <td>194</td> <td>-51</td> <td>193</td> <td>-52</td> <td>192</td> <td>-52</td> <td>1,00</td> <td>0,58</td>	194	-51	193	-52	192	-52	1,00	0,58
201 -52 200 -51 199 -51 1,00 0,58 200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 33 0,58 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 </td <td>195</td> <td>29</td> <td>195</td> <td>29</td> <td>194</td> <td>29</td> <td>0,58</td> <td>0,00</td>	195	29	195	29	194	29	0,58	0,00
200 -158 198 -157 198 -158 1,15 0,58 198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 3 0,58	201	-52	200	-51	199	-51	1,00	0,58
198 72 197 72 195 72 1,53 0,00 197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 3 0,58 0,58 199 33 199 33 198 3 0,58	200	-158	198	-157	198	-158	1,15	0,58
197 43 196 43 196 43 0,58 0,00 198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58	198	72	197	72	195	72	1,53	0,00
198 -67 196 -66 195 -67 1,53 0,58 197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58	197	43	196	43	196	43	0,58	0,00
197 -27 196 -27 195 -27 1,00 0,00 205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00	198	-67	196	-66	195	-67	1,53	0,58
205 -194 203 -194 202 -193 1,53 0,58 202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 <td>197</td> <td>-27</td> <td>196</td> <td>-27</td> <td>195</td> <td>-27</td> <td>1,00</td> <td>0,00</td>	197	-27	196	-27	195	-27	1,00	0,00
202 74 202 75 201 74 0,58 0,58 204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58	205	-194	203	-194	202	-193	1,53	0,58
204 77 202 77 203 72 1,00 2,89 203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 <td>202</td> <td>74</td> <td>202</td> <td>75</td> <td>201</td> <td>74</td> <td>0,58</td> <td>0,58</td>	202	74	202	75	201	74	0,58	0,58
203 -31 201 -30 200 -31 1,53 0,58 201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 <t< td=""><td>204</td><td>77</td><td>202</td><td>77</td><td>203</td><td>72</td><td>1,00</td><td>2,89</td></t<>	204	77	202	77	203	72	1,00	2,89
201 0,017 201 0,017 198 0,016 1,73 0,00 202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	203	-31	201	-30	200	-31	1,53	0,58
202 57 201 58 198 58 2,08 0,58 199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	201	0,017	201	0,017	198	0,016	1,73	0,00
199 33 199 33 198 33 0,58 0,00 198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	202	57	201	58	198	58	2,08	0,58
198 -95 197 -94 197 -95 0,58 0,58 198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	199	33	199	33	198	33	0,58	0,00
198 -30 197 -33 197 -34 0,58 2,08 198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	198	-95	197	-94	197	-95	0,58	0,58
198 4,1 197 4,3 196 4,4 1,00 0,15 196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	198	-30	197	-33	197	-34	0,58	2,08
196 -108 196 -108 195 -108 0,58 0,00 197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	198	4,1	197	4,3	196	4.4	1,00	0,15
197 -77 196 -77 195 -79 1,00 1,15 198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	196	-108	196	-108	195	-108	0,58	0.00
198 -135 197 -136 196 -137 1,00 1,00 197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	197	-77	196	-77	195	-79	1.00	1.15
197 -103 196 -104 196 -104 0,58 0,58	198	-135	197	-136	196	-137	1.00	1.00
	197	-103	195	-104	195	-104	0.58	0.58
204 155 202 156 201 154 152 100	204	100	202	150	201	154	1.50	1.00

Tabela 5.3. Cálculo do desvio padrão das medidas de corrente elétrica "i" e diferença de potencial "ddp", considerando dados adquiridos para se obter a linha de investigação SC1.

Desvio Padrão da Desvio Padrão da Linha de "ddp" (mV) "i" (mA) investigação Máximo Médio Máximo Médio 6,35 SC1 1.07 2.89 0,47 SC2 11,14 1,57 2,89 0,51 SC3 1,53 0,52 13,86 1,04 QC1 3,61 0,22 10,12 0,54 3,21 0,25 1,22 QC2 15,50 QC3 1,53 0.35 3,46 0,20 0,50 QC4 3,51 5,00 0,29 QC5 5,00 0,74 6,03 0,55 0,58 6,66 0,42 AL1 0,01 0,91 AL2 6,08 190,53 1,85 10,41 AL3 184,17 182,73 10,53 AL4 6,35 1,31 28,10 0,86 AL5a 7,02 1,21 1,73 0,22 AL5b 1,53 0,75 23,97 0.35 3,79 0,46 AL6 0,57 18,19 0,01 0,00 0,75 CD1a 11,63 CD1b 0,03 0.00 0.76 0,30 0,00 CD2 0,03 0,58 0,08 CD3 6,50 0,45 1,50 0,12 CD4 2,08 0.57 44,50 0,65 CD5 4,00 0,41 15,00 0,76

Tabela 5.4 Valores do desvio padrão máximo e mínimo calculados para as medidas "i" e "ddp" de todas as linhas de investigação.

5.3. Dados hidrogeológicos dos pontos estudados

Está disponível também no SIAGAS o Mapa Hidrogeológico do Brasil [81, 95, 96], onde podem ser encontradas informações dos Sistemas Aquíferos e Unidades Hidroestratigráficas de cada ponto onde se encontram os poços de interesse. A seguir, os mapas hidrogeológicos da Figura 5.13, da Figura 5.14, da Figura 5.15 e da Figura 5.16 mostram os pontos estudados, respectivamente, em Santa Cruz do Sul, Região da Quarta Colônia, Alegrete e Candelária.


Figura 5.13. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação no município de Santa Cruz do Sul. Adaptado de [81].



Figura 5.14. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação da Região da Quarta Colônia. Adaptado de [81].



Figura 5.15. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação no município de Alegrete. Adaptado de [81].



Figura 5.16. Mapa hidrogeológico indicando a localização dos poços próximos às linhas de investigação no município de Candelária. Adaptado de [81].

A Tabela 5.5 mostra uma síntese dos mapas hidrogeológicos, indicando a Unidade Hidrolotológica (UHL) e Hidroestratigráfica (UHE) na qual estão localizadas cada linha de investigação, lembrando que o Sistema Aquífero Serra Geral trata-se de um aquífero fraturado, e as demais formações consistem em aquíferos granulares.

Tabela 5.5. Unidade Hidrolitológica e Unidade Hidroestratigráfica a qual pertence cada linha de investigação

	Linha	Unidade Hidrolitológica (UHL)	Unidade Hidroestratigráfica (UHE)		
. CRUZ D SUL	SC1	Fr	Serra Geral		
	SC2	Gr	Santa Maria		
Sta D	SC3	Fr	Serra Geral		
AIA	QC1	Gr	Santa Maria		
DLÔN	QC2	Fr	Serra Geral		
A CC	QC3	Gr	Caturrita		
IART	QC4	Gr	Caturrita		
on	QC5	Fr	Serra Geral		
	AL1	Fr	Serra Geral		
	AL2	Fr	Serra Geral		
Ë	AL3	Fr	Serra Geral		
GRE	AL4	Fr	Serra Geral		
ALE	AL5a	Fr	Serra Geral		
	AL5b	Fr	Serra Geral		
	AL6	Fr	Serra Geral		
	CD1a	Gr	Caturrita		
ELÁRIA	CD1b	Gr	Caturrita		
	CD2	Gr	Santa Maria		
AND	CD3	Gr	Santa Maria		
3	CD4	Gr	Caturrita		
	CD5	Gr	Santa Maria		

5.4. Descrição comparativa dos perfis elétricos com dados de poços

A seguir, serão apresentados, em ordem cronológica dos levantamentos, os perfis elétricos obtidos a partir dos dados coletados em campo, acompanhados do georreferenciamento de cada linha de investigação e de uma possível interpretação geológica, com base em valores de resistividade elétrica (ρ) estabelecidos na bibliografia consultada para diferentes tipos de solos, conforme a Tabela 5.6.

	MATERIAL GEOLÓGICO	ρ para o material seco (Ω.m)	ρ para o material saturado (Ω.m)
	Água fresca	-	2000
Águas	Água do mar	-	0,33
	Água subterrânea	-	50 - 100
	Solo arenoso	1050	80
		2700	8 (40% argila)
		3700	33 (20% argila)
Solor	Terreno pantanoso	30	1
30105	Aluvião	800	10
	Areia e cascalho	1 x 10 ⁵	
	Alteração de rocha	1400	100
	Conglomerados	2×10^{3}	
	Arenito	400	25
Dechee	Argilito		
Kochas	Folhelho	1.000	10
Seumentares	Siltito	1.000	10
	Silte		100 a 1000
Rochas Ígneas e	Basalto	1,3 x 10 ⁷	100
Metamórficas	Xisto	4×10^{7}	600

Tabela 5.6. Valores de resistividade elétrica para diferentes materiais geológicos encontrados em subsuperfície. Adaptado de [20, 97-100].

De modo a complementar a interpretação geológica, foi considerado o perfil geológico de cada poço, cujos dados constam na Tabela 5.1 e estão representados também nas figuras de cada imageamento geoelétrico. Cabe ressaltar que os dados relacionados aos poços próximos às linhas investigadas, presentes na Tabela 5.1 e/ou representados nos imageamentos geoelétricos apresentados a seguir, foram obtidos a partir da base de dados do SIAGAS [81], assim como o tipo de aquífero no ponto e os valores de resistividade elétrica de amostras de água. A Unidade Hidroestratigráfica de cada ponto está demarcada nos mapas da Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16, sendo que Unidade Hidrolitológica (UHL) é fraturada

(Fr) quando se trata do Sistema Aquífero Serra Geral e granular (Gr) quando está localizada nos demais pontos.

Cabe observar que, de acordo com os valores registrados na Tabela 5.6, a resistividade elétrica diminui com o aumento do grau de saturação de solos e rochas. Visto que os perfis litológicos de poços indicam o material geológico encontrado em subsuperfície, os valores de resistividade elétrica encontrados no perfil elétrico irão indicar o grau de saturação do material. Essa informação complementar é de grande utilidade para alcançar o propósito do presente trabalho, uma vez que poderá indicar a presença ou não de água na área estudada.

Em algumas linhas de investigação foram obtidos também dados através do método da sísmica de refração [101], que serão comparados com os perfis elétricos. O referido método consiste em mais uma maneira de estudar, de modo indireto, propriedades físicas de camadas encontradas em subsuperfície. Para tanto, são utilizadas fontes de energia capazes de provocar sismos; e um sismógrafo, equipamento capaz de captar as perturbações produzidas, após ondas elásticas terem percorrido camadas no interior da Terra. Essas ondas se propagam com velocidades distintas de acordo com o tipo de material, o que torna possível a identificação de diferentes litologias, sua forma, composição e dimensões [102].

5.4.1. Município de Santa Cruz do Sul (Abril/2017)

A <u>Linha SC1</u> está localizada a cerca de 3 m do poço 4300023674, conforme mostra o georreferenciamento do mapa da Figura 5.17.

De acordo com os dados litológicos, o perfil do poço apresenta solo argiloso entre 0 e 5 metros de profundidade. Esse tipo de solo pode variar sua faixa de resistividade elétrica de cerca de 8 a 33 Ω .m pra materiais saturados, de acordo com o teor de argila [20]. As informações obtidas pelo método geoelétrico (Figura 5.18) mostram que de 0 a aproximadamente 5 metros, os valores de ρ variam de aproximadamente 10 a 150 Ω .m, aumentando com a profundidade.



Figura 5.17 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha SC1 e do poço 4300023674.

De 5 a 17 metros de profundidade, observa-se basalto no perfil litológico, cuja resistividade elétrica pode variar de 100 a 1,3 x $10^7 \Omega$.m [20]. De 5 a 10 metros, temse no imageamento elétrico (Figura 5.18) uma faixa de ρ de aproximadamente 150 a 700 Ω .m. De 10 a 17 metros, os valores continuam aumentando, e ficam entre 700 e 1500 Ω .m.

Comparando-se, então, os dados do perfil litológico do poço 4300023674 com os dados de resistividade elétrica obtidos em campo, pode ser observado um elevado grau de conformidade entre ambos. Entretanto, a conformidade fica mais clara em até 40 m de comprimento da linha, onde a resistividade elétrica aumenta com a profundidade.

Conforme pode ser visto no mapa da Figura 5.13, a unidade hidrolitológica do local do levantamento é fraturada. A interface horizontal entre regiões de alta e baixa resistividade elétrica encontrada em cerca de 40 m de comprimento da linha de investigação pode indicar a presença de uma fratura do Sistema Aquífero Serra Geral, podendo apresentar ótimas características aquíferas [35].

A entrada de água, localizada a 7 metros de profundidade encontra-se aproximadamente na interface entre as regiões de baixa e alta resistividade elétrica, o que demonstra conformidade entre o perfil litológico e o perfil do poço.



Figura 5.18 Imageamento geoelétrico da Linha SC1, localizada no município de Santa Cruz do Sul, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023674.

A resistividade elétrica da água é de 27,5 Ω.m, valor que corresponde aproximadamente àqueles encontrados na região superficial do perfil elétrico, bem como na região entre 40 e 55 m de comprimento da linha de investigação.

Um estudo sísmico [101] realizado exatamente na mesma linha de investigação que SC1, mostrado na Figura 5.19, também é corroborado pelos dados do poço 4300023674, e apresenta conformidade com o perfil elétrico exibido na Figura 5.18.



Figura 5.19. Perfil gerado a partir da técnica de sísmica de refração, no mesmo local da linha de investigação SC1. Adaptado de [101].

A <u>Linha SC2</u> passa pelo poço 4300023609 e ambos estão georreferenciados na Figura 5.20. De acordo com os dados litológicos do perfil geológico do poço, entre 0 e 4 metros de profundidade, há solo argiloso, cuja resistividade elétrica pode variar de 8 a 33 Ω .m para o material saturado [20]. No imageamento geoelétrico (Figura 5.21) da área é possível observar que de 0 a 4 metros de profundidade foram identificados valores de ρ entre aproximadamente 5 e 100 Ω .m, o que pode indicar um menor grau de saturação, já que para o solo argiloso seco, ρ pode chegar a 3700 Ω .m.



Figura 5.20 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha SC2 e do poço 4300023609.

De 4 a 16 metros, tem-se argilito, conforme o perfil litológico. Para o referido material, a resistividade elétrica tende a aumentar em relação ao solo argiloso, uma vez que consiste em uma rocha mais compactada, ou seja, a concentração de água é possivelmente menor. O perfil elétrico mostra que de 4 a 14 m, o mesmo padrão de resistividade encontrado entre 0 e 4 m de profundidade é mantido. Já entre 14 e 16 m, observa-se o aumento gradativo de ρ , cuja faixa fica entre 150 e 1100 Ω .m.

Ao comparar o perfil elétrico da linha SC2 com o perfil geológico do poço 4300023609, observa-se uma certa conformidade entre ambos, considerando-se que existe um aumento da resistividade elétrica com a profundidade. Porém, de acordo com o perfil do poço, a interface entre solo argiloso e argilito está em 4 metros de profundidade; já no perfil elétrico, o aumento mais visível de resistividade se dá em aproximadamente 14 metros de profundidade. Isso demonstra um deslocamento vertical, que pode ocorrer devido a limitações características do método da eletrorresistividade, entre elas uma menor resolução vertical do arranjo dipolo-dipolo se comparada com outros arranjos, conforme mostra a Tabela 3.1.



Figura 5.21 Imageamento geoelétrico da Linha SC2, localizada no município de Santa Cruz do Sul, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023609.

Conforme pode-se observar na Figura 5.13, a linha SC2 e o poço 4300023609 se encontram em uma região de aquífero granular pertencente à Unidade Hidroestratigráfica Santa Maria, o que pode ser confirmado através do perfil elétrico, que mostra a predominância de valores baixos de resistividade elétrica. Os valores mais elevados de ρ encontrados em profundidades maiores do perfil elétrico podem ser devido aos siltitos, que costumam ser argilosos e maciços na Formação Santa Maria [32].

A <u>Linha SC3</u> (georreferenciada na Figura 5.22) está localizada a cerca de 60 metros de um poço controlado pela EMATER (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural), nas dependências da Escola Técnica Agrícola do município de Santa Cruz do Sul.



Figura 5.22 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha SC3 e de poços próximos. A seta indica a direção e o sentido do poço 4300023616, que se encontra a cerca de 2,4 km de distância da linha de investigação.

Embora o perfil do poço não tenha sido obtido, fez-se uma possível interpretação da geologia do local, de acordo com os dados do perfil elétrico mostrado na Figura 5.23, onde observa-se que a resistividade elétrica aumenta com a profundidade. De 0 a 5 metros, tem-se valores baixos de resistividade elétrica, menores que 10 Ω .m. De aproximadamente 5 a 10 m, encontram-se valores intermediários, entre 10 e 400 Ω .m. Já entre 10 e 16 m, a resistividade elétrica alcança cerca de 2000 Ω .m nas regiões mais profundas. Tais informações indicam que possivelmente a área possui solo arenoso ou argiloso, e que solos com maior teor de argila ou rochas mais compactadas podem ser encontrados conforme ocorre o aumento a profundidade.

Após a interpretação, procurou-se, através do SIAGAS, algum poço próximo à linha de investigação. Optou-se então por utilizar dados do poço 4300023616, de propriedade da CORSAN, que fica a cerca de 750 m da linha de investigação. O perfil geológico apresenta, de 0 a 4 metros de profundidade, solo argiloso, cuja resistividade elétrica varia de 8 a 33 Ω .m [20]. De 4 a 16 m, tem-se argilito, e, assim, os valores de *p* tendem a aumentar, uma vez que consiste em uma formação mais compactada que o solo argiloso (como foi visto anteriormente, na descrição da linha SC2). Enfim, os dados do imageamento geoelétrico são corroborados pelos dados do perfil do poço, demonstrando uma conformidade entre ambos e mostrando a confirmação da interpretação geológica feita antes da obtenção do perfil geológico.

Em L \approx 55 m, tem-se uma faixa de resistividade elétrica mais baixa em relação ao meio, que pode indicar uma fratura, já que, de acordo com a Figura 5.13, o levantamento geofísico foi realizado dentro da porção do Sistema Aquífero Serra Geral, que apresenta porosidade exclusivamente por fraturas.



Figura 5.23 Imageamento geoelétrico da Linha SC3, localizada no município de Santa Cruz do Sul, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023616.

A Tabela 5.7 mostra uma síntese dos dados das linhas de investigação de Santa Cruz do Sul, comparando os valores teóricos de resistividade elétrica, indicados para a litologia descrita no poço, com os valores de resistividade elétricas medidos, de acordo com a variação de profundidade. Tabela 5.7. Dados comparativos entre os valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço e os valores de resistividade elétrica medidos, de acordo com a variação de profundidade, considerando as linhas de investigação de Santa Cruz do Sul.

LINHA	PERFIL DO POÇO			PERFIL ELÉTRICO	
	Prof. poço (m)	Descrição litológica	Valores teóricos de ρ (Ω.m)	Prof. (m)	Faixa aprox. de ρ medida (Ω.m)
SC1	0 – 5	solo argiloso	8 – 33 3700	0 – 5	10 – 150
	5 – 17	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	5 – 10 10 – 17	150 – 700 700 – 1500
SC2	0 – 4	solo argiloso	8 – 33 3700	0 – 4	5 – 100
	4 – 16	argilito	Tendem a aumentar	4 – 14 14 – 16	5 – 100 150 – 1100
SC3	0 – 4	solo argiloso	8 – 33 3700	0 - 5	< 10
	4 – 16	argilito	Tendem a aumentar	10 – 16	Até 2000

5.4.2. Região da Quarta Colônia (Setembro/2017)

A Linha QC1, georreferenciada no mapa da Figura 5.24 passa pelo poço 4300021299.



Figura 5.24 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC1 e do poço 4300021299.

De acordo com os dados litológicos do perfil geológico, entre 0 e 4 metros de profundidade, encontra-se solo argiloso, cuja faixa de resistividade elétrica varia entre 8 Ω .m (40% de argila) e 33 Ω .m (20% de argila) [20], ou seja, ρ aumenta com

a diminuição do teor de argila. Entre 4 e 16 m de profundidade, o perfil litológico mostra arenito argiloso. A faixa de ρ do arenito está entre 100 a 400 Ω .m [20]. Como a presença de argila no material diminui sua resistividade elétrica, é possível estimar que a ρ para o arenito argiloso apresenta valores próximos ou menores que 100 Ω .m.

As informações do imageamento geoelétrico (Figura 5.25) mostram que de aproximadamente 0 a 6 metros de profundidade os valores de resistividade elétrica variam de 350 a 1200 Ω .m, sendo que essa camada aumenta sua espessura com o comprimento da linha. Em uma região mais profunda, de 15 a 17 m, observa-se comportamento semelhante, com variação de 150 a 1600 Ω .m para ρ . Entre essas duas camadas, que corresponde a profundidades entre 6 a 15 m, há uma região de ρ predominantemente mais baixa, de 5 a 100 Ω .m.

A resistividade elétrica da água é de 28,6 Ω.m, que corresponde no perfil elétrico à faixa de profundidade intermediária. Considerando que o perfil litológico do poço indica arenito argiloso nessa zona, é possível que se trate de rocha saturada em água.



Figura 5.25 Imageamento geoelétrico da Linha QC1, localizada no município de Agudo/RS, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300021299.

De acordo com dados da Figura 5.14, o aquífero no ponto é granular, o que justifica os valores baixos de resistividade elétrica encontrados no perfil da Figura 5.25, entre cerca de 6 e 15 m de profundidade. A região de resistividade elétrica mais elevada, observada próxima à superfície, pode ocorrer devido à baixa

saturação em água do solo, ou à presença de siltitos argilosos, que são tipicamente maciços na Formação Santa Maria.

A <u>Linha QC2</u> está georreferenciada no mapa da Figura 5.26, e a área foi selecionada devido à presença de um poço que pertence a prefeitura de Agudo e está sob os cuidados da EMATER. Como o perfil geológico do poço não foi disponibilizado, analisou-se inicialmente apenas o perfil elétrico da linha de investigação, mostrado na Figura 5.27, que revelou valores predominantemente elevados de ρ , na faixa de aproximadamente 300 a 1400 Ω .m, o que poderia corresponder a solo arenoso seco, cuja resistividade elétrica varia entre 80 e 1050 Ω .m [20], ou a basalto, que apresenta ρ na faixa de 10 a 1,3 x 10⁷ Ω .m [20].



Figura 5.26 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC2.

Diante da ausência de dados relativos ao poço, fez-se uma pesquisa no SIAGAS com a finalidade de encontrar outro poço próximo a QC2, e, como resultado, tem-se o poço 4300006571, localizado a cerca de 2,5 km da linha de investigação. O perfil litológico do referido poço mostra a presença de basalto ao longo de toda a profundidade alcançada, confirmando uma das possibilidades de interpretação geológica do levantamento geofísico, descrita anteriormente.



Figura 5.27 Imageamento geoelétrico da Linha QC2, localizada no município de Agudo/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006571.

Entretanto, entre cerca de 35 e 45 m de comprimento (e entre 10 e 15 m de profundidade), encontra-se uma região de baixa resistividade, que varia entre 50 e 150 Ω .m, o que provavelmente indica uma falha na formação basáltica, visto que, de acordo com a Figura 5.14, o aquífero no ponto é do tipo fraturado, característica típica do Sistema Aquífero Serra Geral.

A Linha QC3, georreferenciada no mapa da Figura 5.28, passa pelo poço 4300007744.



Figura 5.28 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC3 e do poço 4300007744.

Dados litológicos do poço mostram a presença de solo areno-argiloso entre 0 e 12 metros de profundidade. Sabe-se que a resistividade elétrica para solo arenoso seco pode variar de 80 a 1050 Ω .m. Já para solos argilosos, esse valor é fortemente dependente do teor de argila, variando de 8 Ω .m para solos com 40% de argila a 33 Ω .m para uma composição de 20% de argila [20]. Como o conteúdo de argila no material não é especificado nos dados do poço 4300007744, torna-se difícil fazer estimativas mais precisas do valor de ρ correspondente. Para profundidades maiores, de 12 a 16 m, o perfil do poço mostrou uma camada de folhelho, cuja resistividade elétrica pode apresentar valores de até 1000 Ω .m.

O imageamento elétrico da linha investigada pode ser observado na Figura 5.29 e mostra que toda a área apresenta valores de resistividade elétrica variando de cerca de 70 a 200 Ω .m, compatível com estruturas geológicas características de um aquífero granular, que, de acordo com dados da Figura 5.14, é o tipo no qual está localizado o poço correspondente à linha QC3. O aparecimento de folhelhos em uma matriz de solo argiloso também é típico da Formação Caturrita [32].



Figura 5.29 Imageamento geoelétrico da Linha QC3, localizada no município de Dona Francisca/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300007744.

É correto afirmar que a compatibilidade entre o perfil do poço e o imageamento elétrico é razoável, considerando que as faixas de ρ das estruturas identificados no perfil do poço abrangem a faixa de ρ encontrada no imageamento elétrico. Entretanto, não foram identificadas camadas horizontais estratificadas, que pudessem representar uma interface entre o solo areno-argiloso e o folhelho.

Além disso, uma exceção ocorre na região localizada entre 35 e 50 m de comprimento da linha de investigação, onde há ocorrência de valores de resistividade elétrica bem mais elevados, entre 300 e 2400 Ω .m, o que possivelmente representa uma rocha arenítica ou basáltica local, ou ainda siltitos e folhelhos comuns na Formação Caturrita [32].

A resistividade elétrica da água é de 9,4 Ω.m, mas essa faixa de valores não aparece no perfil elétrico, o que pode significar uma baixa saturação em água das estruturas encontradas em subsuperfície.

A Linha QC4, georreferenciada no mapa da Figura 5.30 passa pelo poço 4300023461.



Figura 5.30 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC4 e do poço 4300023461.

Os dados litológicos do perfil do poço (mostrado na Figura 5.31, junto com o perfil elétrico) mostram diferentes camadas de espessuras menores se comparadas aos perfis anteriores. Até 4 metros de profundidade, tem-se solo argiloso arenoso. Conforme discutido anteriormente, a resistividade elétrica para solo arenoso seco varia de 80 a 1050 Ω .m [20], enquanto para solos argilosos, esse valor está relacionado ao teor de argila, variando entre 8 Ω .m (40% de argila) e 33 Ω .m (20%

de argila) e chegando a 3700 Ω .m para solos muito secos [20]. No imageamento geoelétrico, encontra-se para a mesma profundidade valores de resistividade elétrica entre 180 e 1200 Ω .m.



Figura 5.31 Imageamento geoelétrico da Linha QC4, localizada no município de Faxinal do Soturno/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300023461.

De 4 a 6 metros de profundidade verifica-se arenito muito fino, cuja faixa de resistividade elétrica está entre 100 e 400 Ω .m [20]. O imageamento elétrico exibe, para o referido intervalo de profundidade, valores de ρ diminuindo em relação à camada anterior, permanecendo entre 80 e 180 Ω .m.

De 6 a 7,5 metros de profundidade, tem-se arenito e argilito, sendo que a presença de argila tende a diminuir a resistividade elétrica do material. O imageamento elétrico corresponde a essa queda de ρ , e mostra valores entre 15 a 80 Ω .m para a mesma profundidade.

Em seguida, de 7,5 a 12 metros, há ocorrência de seixos (cascalho) e alterações, cuja resistividade elétrica pode variar de 100 a 1400 Ω .m. Nessa profundidade, ρ apresenta uma pequena queda, ficando entre 1 e 15 Ω .m, o que pode estar associado a uma maior saturação em água da camada. De 12 a 13 m de profundidade, há novamente arenito fino e ρ começa novamente a aumentar com a profundidade, variando entre 300 e 450 Ω .m.

Observa-se que, de modo semelhante ao que ocorre no perfil litológico do poço, o imageamento elétrico (Figura 5.31) mostra uma grande variação horizontal, com diferentes camadas finas. É possível perceber ainda que nas camadas do perfil

geológico onde se encontram "arenito muito fino" e "arenito fino", os valores de ρ detectados através do levantamento geoelétrico também são similares entre si, demonstrando novamente a validade do método.

A resistividade elétrica da água é de 37,0 Ω.m. No perfil elétrico, esse valor corresponde à faixa entre cerca de 5 e 8 metros de profundidade, indicando que tal zona pode ser mais propícia à ocorrência de água.

De acordo com dados da Figura 5.14, o aquífero no ponto onde se encontra o poço é granular, o que justifica os valores baixos de resistividade elétrica encontrados em todo o imageamento elétrico, uma vez que nesse tipo de aquífero é reduzida a possibilidade de se encontrar rochas altamente resistivas. Além disso, intercalação de arenitos finos e médios dentro de uma matriz de argila, vista no perfil elétrico na linha QC4, é típica da Formação Caturrita [32].

A Linha QC5, georreferenciada no mapa da Figura 5.32 passa pelo poço 4300002705.



Figura 5.32 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha QC5 e do poço 4300002705.

O perfil do poço mostra a presença de uma camada de solo areno-argiloso e argilo-arenoso até 3 metros de profundidade. A resistividade elétrica para solo arenoso seco varia de 80 a 1050 Ω .m [20]. Já para solos argilosos, esse valor depende do teor de argila, variando de 8 a 33 Ω .m, podendo alcançar até 3700 Ω .m [20]. De 3 a 13 metros de profundidade registrou-se no perfil do poço a presença de basalto fraturado, cujo valor de ρ é consideravelmente maior que do material litológico encontrado mais próximo à superfície, podendo variar de 100 a 1,3 x 10⁷ Ω .m [20]. A presença de basalto fraturado é característica do Sistema Aquífero Serra Geral, onde, de acordo com a Figura 5.14, localiza-se a linha QC5.

O perfil elétrico da linha de investigação QC5 é exibido na Figura 5.33, onde observa-se que, até cerca de 4 m, a resistividade elétrica é equivalente a aproximadamente 50 Ω .m, o que corresponde a solo areno-argiloso. Já, de 4 a 13 metros, ρ varia fortemente com a profundidade, alcançando valores de 50 a 2400 Ω .m, o que é possivelmente compatível com basalto. Assim, fica clara a conformidade entre o imageamento elétrico e o perfil elétrico do poço próximo.



Figura 5.33 Imageamento geoelétrico da Linha QC5, localizada no município de Nova Palma/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300002705.

A Figura 5.34 exibe um estudo sísmico [101] realizado exatamente na mesma linha de investigação que QC5. Uma comparação com os dados do poço 4300002705 mostra uma conformidade para a camada mais superficial do solo. Comparando-se os dados sísmicos com o perfil elétrico da Figura 5.33, são observadas semelhanças, considerando-se que a partir dos 5 m de profundidade há um acentuado aumento tanto da resistividade elétrica como da velocidade.



Figura 5.34. Perfil gerado a partir da técnica de sísmica de refração, no mesmo local da linha de investigação QC5. Adaptado de [101].

A Tabela 5.8 mostra uma síntese dos dados das linhas de investigação da Região da Quarta Colônia, comparando os valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço com os valores de ρ medidos, de acordo com a variação de profundidade.

Tabela 5.8. Dados comparativos entre os valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço e os valores de resistividade elétricas medidos, de acordo com a variação de profundidade, considerando as linhas de investigação da Região da Quarta Colônia.

LINHA	PERFIL DO POÇO			PERFIL ELÉTRICO	
	Prof. poço (m)	Descrição litológica	Valores teóricos de ρ (Ω.m)	Prof. (m)	Faixa aprox. de ρ medida (Ω.m)
QC1	0-4	solo argiloso	8 (40% de argila) - 33 (20% de argila)	0 – 4	150 – 1200
	4 – 16	arenito argiloso	100 – 400 (arenito) + argila diminui R	4 – 6 6 – 15 15 – 17	150 – 1200 5 – 100 150 – 1600
QC2	0 – 16	basalto solo arenoso seco	10 – 1,3 x 10 ⁷ 80 – 1050	0 – 16	300 – 1400
QC3	3 0 – 12 solo areno- argiloso 80 – 10 seco)		8 (40% de argila) - 33 (20% de argila) 80 – 1050 (arenoso seco)	0 – 16	300 – 2400 para L entre 35 e 50 m 70 – 200 nas
	12 – 16	folhelho	10 – 1000		demais regiões
	0 – 4	solo argiloso arenoso	8 (40% de argila) - 33 (20% de argila) 80 – 1050 (arenoso seco)	0 – 4	180 – 1200
	4 – 6	arenito muito fino	100 – 400	4 – 6	80 – 180
	6 – 7,5	arenito e argilito	presença de argila diminui R	6 – 7,5	15 – 80
QC4	7,5 – 12	seixos (cascalho) e alterações	100 – 1400	7,5 – 12	1 – 15
	12 – 13	arenito fino	100 – 400	12 – 13	300 – 450
QC5	0-3	solo areno-argiloso e argilo-arenoso	8 (40% de argila) - 33 (20% de argila) 80 – 1050 (arenoso seco) 3700	0-4	40 – 50
	3 – 13	basalto fraturado	100 – 1,3 x 10 ⁷	4 – 13	50 – 2400

5.4.3. Município de Alegrete (Abril/2018)

A Linha AL1 passa próxima ao poço 4300026139 e ambos estão georreferenciados na Figura 5.35.



Figura 5.35 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL1 e do poço 4300026139.

De acordo com os dados do perfil litológico do poço, entre 0 e 21 metros de profundidade, foi identificada a presença de basalto no local, cuja resistividade elétrica é elevada, estando entre 100 a 1,3 x $10^7 \Omega$.m [20]. No imageamento geoelétrico (Figura 5.36), observa-se que toda a área investigada apresenta valores de ρ iguais ou superiores a 2400 Ω .m, o que abrange a faixa correspondente ao basalto.

Dessa maneira, o perfil geológico do poço e o perfil elétrico demonstraram uma aparente compatibilidade entre si. Entretanto, é incomum que um perfil elétrico apresente apenas uma faixa de valores de resistividade elétrica. A uniformidade observada na Figura 5.36 ocorreu provavelmente devido ao fato do terreno estar extremamente seco no momento da aquisição dos dados. Utilizou-se água para umedecer a região próxima aos eletrodos e assim melhorar a condutividade elétrica, mas, devido ao tempo seco e à temperatura elevada, é possível que tal procedimento não tenha sido suficiente e as medidas tenham sido prejudicadas. Essa anomalia fica ainda mais evidente se analisadas a Figura 5.41, a Figura 5.45 e a Figura 5.46, cujos perfis geológicos também são formados por basalto em toda a



profundidade alcançada pelos levantamentos geofísicos, e no entanto existe variação de ρ ao longo dos imageamentos, como será visto em seguida.

Figura 5.36 Imageamento geoelétrico da Linha AL1, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300026139.

Dados como a resistividade elétrica da água e o tipo de aquífero no ponto (se granular ou fraturado), não foram considerados na análise do imageamento elétrico da linha AL1, já que possivelmente houve prejuízo às medidas devido ao solo estar extremamente seco e, assim, não há descontinuidades na imagem, conforme explicado anteriormente.

A <u>Linha AL2</u> localiza-se próxima ao poço 4300021214, estando ambos georreferenciados na Figura 5.37.

Os dados litológicos do perfil do poço mostram diferentes camadas estratificadas. De 0 a 3 metros de profundidade há solo areno-argiloso. Conforme já foi repetidamente discutido, esse tipo de solo pode variar sua faixa de ρ entre 8 Ω .m a 33 Ω .m [20], sofrendo aumento com a diminuição do teor de argila. De 3 a 12 metros de profundidade, ocorre alteração de rocha. Estima-se que o valor de resistividade elétrica para esse tipo de litologia se aproxime dos valores para conglomerados, que se encontram na ordem de 2 x 10³ Ω .m. Já de 12 a 16 m se observa arenito, material cuja faixa de ρ está entre 100 a 400 Ω .m. De 16 a 21 metros de profundidade está presente o basalto, que se caracteriza por apresentar ρ elevada, entre 100 a 1,3 x 10⁷ Ω .m [20].



Figura 5.37 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL2 e do poço 4300021214.

O perfil elétrico da linha de investigação exibe algumas regiões tanto de baixa como de alta ρ , que devem ser destacadas. Entre 25 e 30 metros de comprimento da linha, bem como entre 45 e 50 m, numa profundidade de até 15 metros, observam-se áreas de baixa resistividade elétrica (entre ~ 10 e 20 Ω .m), que possivelmente correspondem à presença de água. Alternadamente a essas regiões, entre 35 e 45 m, e entre 55 e 70 m de comprimento da linha, em profundidades entre 7 e 15 m, há regiões de resistividade elétrica mais elevada (entre ~ 200 e 1200 Ω .m), que podem corresponder ao arenito, a rochas mais compactadas, e até mesmo ao basalto. As demais áreas apresentam ρ intermediária (entre ~ 20 e 200 Ω .m), o que provavelmente representa solos ora mais secos ora mais úmidos, com maior e menor teor de argila.

Percebe-se que, de acordo com o perfil litológico do poço, é possível que os valores de resistividade elétrica da área estudada variem de 8 a 1,3 x $10^7 \Omega$.m, o que consiste em uma faixa muito ampla de valores. Já no perfil elétrico identificouse uma variação de aproximadamente 10 a 1200 Ω .m, que ocorre de modo mais perceptível no sentido horizontal. Visto que o perfil litológico de um poço é definido por uma sucessão de camadas horizontais, a variação em ρ se dá verticalmente, tornando mais complexa a análise da compatibilidade entre o perfil do poço e o imageamento elétrico.



Figura 5.38 Imageamento geoelétrico da Linha AL2, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300021214.

Um estudo sísmico [101] realizado exatamente na mesma linha de investigação que AL2, mostrado na Figura 5.39, revelou camadas que se assemelham ao perfil litológico do poço 4300021214. Os resultados da sísmica de refração corroboram com o perfil elétrico da Figura 5.38 se forem consideradas apenas as regiões entre 35 e 45 m, e entre 55 e 70 m de comprimento da linha de investigação, as quais apresentam resistividades elétricas mais elevadas.



Figura 5.39. Perfil gerado a partir da técnica de sísmica de refração, no mesmo local da linha de investigação AL2. Adaptado de [101].

O aquífero no ponto é do tipo fraturado, pertencente ao Sistema Aquífero Serra Geral. Assim, entende-se que as regiões entre 35 e 45 m, e entre 55 e 70 m (de comprimento da linha de investigação) se tratam de rochas basálticas (estrutura geológica que aparece também no perfil litológico do poço), e que as demais regiões são fraturas, possivelmente preenchidas por água em elevado grau de saturação, uma vez que a resistividade elétrica da água é de 16,8 Ω .m, valor que no imageamento elétrico aparece entre as rochas. Tais características são compatíveis com o Sistema Aquífero Serra Geral, que pode apresentar, em alguns pontos, boas características aquíferas, adequadas para poços com elevada vazão [35].

A Linha AL3 está localizada próxima ao poço 4300024853, e ambos estão georreferenciados na Figura 5.40.



Figura 5.40 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL3 e do poço 4300024853

O imageamento elétrico da linha de investigação AL3 (Figura 5.41) mostra para camada mais superficial (entre 0 e 9 metros de profundidade), uma região de resistividade elétrica baixa, entre cerca de 5 e 150 Ω .m. Já entre 9 e 21 metros de profundidade, observa-se a alternância de regiões de baixa e alta resistividade elétrica. Entre 20 e 40 metros de comprimento da linha, bem como entre 55 e 70 m, encontram-se valores de ρ mais elevados (entre ~ 150 e 400), que podem corresponder ao arenito, a rochas mais compactadas, e até mesmo ao basalto.

Alternadamente a essas regiões, entre 40 e 55 m de comprimento da linha de investigação, há regiões de ρ menor (entre ~ 5 e 150 Ω .m), que possivelmente correspondem à presença de água.

O perfil litológico do poço mostra que, ao longo de toda a profundidade alcançada no levantamento geoelétrico, está presente o basalto, litologia que no perfil elétrico corresponde possivelmente às faixas de resistividade mais elevadas.



Figura 5.41 Imageamento geoelétrico da Linha AL3, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300024853.

Conforme indica a Figura 5.15, a linha AL3 se encontra em área de aquífero do tipo fraturado Serra Geral. Assim, cabe a interpretação de que a região entre 40 e 50 metros de comprimento da linha de investigação consiste em uma fratura propícia ao armazenamento de água, pois se trata de uma região de baixa resistividade elétrica, entre duas áreas de resistividade elétrica mais elevada. O Sistema Aquífero Serra Geral adquire porosidade unicamente por fraturas, e pode apresentar características aquíferas relevantes em certos pontos [35].

A resistividade elétrica medida para a água é de 100,1 Ω .m, o que pode significar que, na região próxima à superfície do terreno e entre os 40 e 50 m de comprimento de AL3, a água está presente.

A Linha AL4, está localizada próxima ao poço 4300001349, conforme é mostrado no georreferenciamento da Figura 5.42.



Figura 5.42 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL4 e do poço 4300001349.

De acordo com informações do perfil litológico do poço, de 2 a 21 metros de profundidade tem-se basalto, cuja resistividade elétrica está na faixa de 100 a 1,3 x $10^7 \ \Omega$.m [20]. Na região mais próxima à superfície, entre 0 e 2 metros de profundidade, encontra-se solo de basalto, que possui resistividade elétrica menor que a do basalto.

O perfil elétrico da linha de investigação AL4, exibido na Figura 5.43, mostra de modo geral ρ aumentando com a profundidade, que também ocorre com a litologia descrita no perfil geológico do poço, conforme visto anteriormente. Até aproximadamente 10 metros de profundidade, observa-se na Figura 5.43 valores de resistividade elétrica entre cerca de 20 e 180 Ω .m, que indica solo areno-argiloso, argilo-arenoso, ou possivelmente solo de basalto. De 10 a 21 m de profundidade, tem-se uma variação de 180 a 800 Ω .m, o que pode ser compatível com basalto, especialmente até os 50 m de comprimento da linha, onde ρ atinge seus valores mais elevados.

A resistividade elétrica da água é de 35,6 Ω.m, valores compatíveis com a região do imageamento elétrico mais próxima à superfície do terreno.



Figura 5.43 Imageamento geoelétrico da Linha AL4, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300001349.

O aquífero encontra-se em região de aquífero fraturado Serra Geral, de acordo com dados mostrados na Figura 5.15. Assim, pode-se afirmar que a região de resistividade mais elevada, localizada entre L = 30-55 m e abaixo de 10 m de profundidade, corresponde a uma rocha basáltica, já que essa estrutura geológica consta também no perfil litológico do poço. Assim, as demais áreas do imageamento elétrico, cuja resistividade elétrica é menor, são possivelmente basaltos alterados. Salienta-se que o Serra Geral pode apresentar excelentes características aquíferas em determinados pontos, exibindo poços com elevada vazão [35].

A <u>Linha AL5a</u> e a <u>Linha AL5b</u> estão georreferenciadas na Figura 5.44, que mostra a perpendicularidade entre ambas.

O perfil geológico dos poços mais próximos, controlados pela EMATER, também aparecem na Figura 5.44 e não foram disponibilizados, e assim procurouse no SIAGAS poços cujos dados fossem úteis para a comparação com o imageamento elétrico obtido. O poço mais próximo fica a cerca de 3,2 km de distância da linha de investigação e é identificado pelo número 4300001641.

O perfil elétrico das linhas AL5a (Figura 5.45) e AL5b (Figura 5.46) apresentam semelhanças nas faixas de resistividade elétrica presentes, já que foram obtidos a partir de linhas perpendiculares entre si.



Figura 5.44 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL5a e AL5b, nas dependências da "Fundação". Não foi possível obter dados litológicos do Poço A e do Poço B.

O imageamento da linha AL5a (Figura 5.45) mostra um perfil cuja resistividade elétrica varia de 10 a 400 Ω .m. Até 8 m de profundidade, ρ se encontra ente 10 e 150 Ω .m, valores típicos para solos arenosos e argilosos. Entre 8 e 20 m de profundidade tem-se, no início da linha de investigação, uma região de resistividades mais elevadas, entre 150 e 400 Ω .m, o que possivelmente representa arenito, mas também há a possibilidade de corresponder a basalto na área estudada. Os valores de ρ diminuem com o aumento do comprimento da linha, ficando entre 10 e 150 Ω .m. Na faixa mais profunda da linha de investigação, entre 20 e 21 m, a resistividade elétrica tende a ficar ainda menor, entre cerca de 5 e 120 Ω .m.

O imageamento da linha AL5a (Figura 5.46) mostra um perfil aproximadamente homogêneo, com resistividade elétrica variando entre 10 e 150 Ω .m. Semelhante ao que ocorre na linha AL5a, a região de resistividade elétrica mais elevada está entre 10 e 20 metros de profundidade, no início da linha de investigação.



Figura 5.45 Imageamento geoelétrico da Linha AL5a, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300001641.



Figura 5.46 Imageamento geoelétrico da Linha AL5b, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300001641.

Em toda a profundidade investigada nas linhas AL5a e AL5b, o perfil geológico do poço 4300001641 mostra a presença de basalto, cuja resistividade elétrica apresenta uma faixa de valores extensa, que vai de 100 a 1,3 x $10^7 \Omega$.m [20]. Dessa maneira, estima-se que as zonas de resistividade elétrica mais elevadas, exibidas principalmente na Figura 5.45, possam representar uma área de fraturamento possivelmente preenchida por água, já que os valores de ρ tendem a ser mais baixos que do basalto. Fraturas são a única fonte de porosidade nas áreas recobertas pelo Sistema Aquífero Serra Geral [35], onde foram realizados os levantamentos das linhas AL5a e AL5b. Os imageamentos elétricos realizados perpendicularmente entre si apresentam, de modo geral, uma mesma faixa de resistividade elétrica, bem como uma semelhança na forma das camadas identificadas, comprovando que tratam-se de dados adquiridos em áreas próximas. Porém, na Figura 5.46, que mostra o imageamento geoelétrico de AL5b, a zona de resistividade mais elevada fica menos evidente, mostrando que o aparecimento de estruturas geológicas em subsuperfície podem ocorrer em direções preferenciais, sendo identificadas apenas em um determinado sentido do caminhamento elétrico.

Conforme dados da Figura 5.15, o tipo de aquífero do ponto é fraturado (Sistema Aquífero Serra Geral), o que está de acordo com o perfil litológico do poço, que mostra basalto em toda a profundidade alcançada pelos dois imageamentos elétricos. Porém, predominam para ambas as linhas de investigação valores de resistividade elétrica reduzidos. Uma explicação possível é que os levantamentos podem ter sido realizados em uma região preferencial para a ocorrência de fraturas, sendo que essa preferência é ainda mais clara na linha AL5b do que na AL5a, uma vez que a segunda exibe regiões de resistividade elétrica mais elevada. Além disso, a resistividade medida para a água é de 45,4 Ω .m, valor bastante presente tanto na linha de investigação AL5a como na AL5b.

Na Figura 5.47 tem-se o georreferenciamento da <u>Linha AL6</u> e do poço 4300001355. Conforme dados da Figura 5.15, o tipo de aquífero do ponto é fraturado, o que está de acordo com o perfil litológico do poço, que mostra basalto em toda a profundidade alcançada pelos dois imageamentos elétricos. Porém, predominam para ambas as linhas de investigação valores de resistividade elétrica reduzidos. Uma explicação possível é que os levantamentos podem ter sido realizados em uma região preferencial para a ocorrência de fraturas, sendo que essa preferência é ainda mais clara na linha AL5b do que na AL5a, uma vez que a segunda exibe regiões de resistividade elétrica mais elevada. Além disso, a resistividade medida para a água é de 45,4 Ω .m, valor bastante presente tanto na linha de investigação AL5a como na AL5b.



Figura 5.47 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha AL6, próxima ao poço 4300001355.

No imageamento elétrico da Linha AL6, exibido na Figura 5.48, pode-se observar a predominância de uma área cuja resistividade elétrica varia entre 40 e 180 Ω .m, e diminui com a profundidade. Estes valores representam possivelmente solo arenoso ou argiloso. Especialmente na área que vai de 30 a 45 metros de comprimento, há uma zona de ρ mais elevada, entre 250 e 700 Ω .m.

O perfil litológico do poço próximo à linha de investigação mostra que entre 1 e 17 m de profundidade encontra-se basalto, cuja resistividade elétrica varia de 100 a 1,3 x 10⁷ Ω .m [20]; já na região mais rasa, até 1 m de profundidade, é indicada a presença de alteração de basalto, cuja ρ é menor que a do basalto. Assim, entendese que o perfil geológico do poço apresenta maior conformidade com o perfil elétrico na região que vai de 30 a 45 m de comprimento da linha de investigação.

A resistividade elétrica da água é de 46,3 Ω.m, valor bastante presente no imageamento elétrico a partir de cerca de 10 m de profundidade, e em toda a extensão da linha de investigação a partir de cerca de 14 m de profundidade.

O levantamento geofísico da linha AL6 foi realizado no Sistema Aquífero Serra Geral (fraturado), conforme dados mostrados na Figura 5.15. Isso explica a presença de basalto no perfil litológico do poço, e também pode estar relacionado a presença de uma região de alta resistividade elétrica no imageamento, entre 30 e 45 m de comprimento da linha de investigação.



Figura 5.48 Imageamento geoelétrico da Linha AL6, localizada no município de Alegrete/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300001355.

A Tabela 5.9 mostra uma síntese dos dados das linhas de investigação de Alegrete, comparando os valores teóricos de ρ indicados para a litologia descrita no poço com os valores de resistividade elétricas medidos, de acordo com a variação de profundidade.

Tabela 5.9. Dados comparativos entre os valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço e os valores de resistividade elétricas medidos, de acordo com a variação de profundidade, considerando as linhas de investigação de Alegrete.

LINHA	PERFIL DO POÇO			PERFIL ELÉTRICO	
	Prof. poço (m)	Descrição litológica	Valores teóricos de $ρ$ (Ω.m)	Prof. (m)	Faixa aprox. de <i>ρ</i> medida (Ω.m)
AL1	0 – 21	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	0 – 21	2400
AL2	0-3	solo areno-argiloso	8 (40% de argila) - 33 (20% de argila) 3700	0 – 7	20 – 60
	3 – 12	alteração de rocha	2,0 x 10 ³		200 – 1200 pra L=35-45m e L=55-70m
	12 – 16	arenito	100 – 400	7 – 15	10 – 200 pras demais áreas
	16 – 21	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	15 – 21	10 – 200
AL3	0 – 21	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	0-9	5 – 150
				9 – 21	5 – 150 pra L=40-55m 150 – 400 pra L=20-40m e L=55-70m
AL4	0 – 2	solo de basalto	< 100 – 1,3 x 10 ⁷	0 – 10	20 – 180
	2 – 21	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	10 – 21	180 – 800
AL5a	0 – 21	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	0 – 8	10 – 150
				8 – 20	150 – 400
				20 – 21	5 – 120
AL5b	0 – 21	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	0 – 21	10 – 150 Alto ρ em L=20-35
AL6	0 – 1	alteração de basalto	< 100 – 1,3 x 10 ⁷	0-6	50 – 150, aumentando com a profundidade
	1 – 17	basalto	100 – 1,3 x 10 ⁷	6 – 15 15 – 17	150 – 800 pra L=30-45m 50 – 150 Pras demais partes 50 – 150
5.4.4. Município de Candelária (Julho/2018)

A <u>Linha CD1a</u> e a <u>Linha CD1b</u> estão georreferenciadas no mapa da Figura 5.49, juntamente com o poço 4300006306.



Figura 5.49 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD1a e CD1b e do poço 4300006306.

O perfil litológico do poço 4300006306, próximo às linhas de investigação mostra três diferentes camadas dentro da profundidade alcançada no perfil geoelétrico. De 0 a 4 metros tem-se solo argiloso, cuja resistividade varia de acordo como o teor de argila, sendo de 8 Ω .m para um teor de 40% de argila e de 33 Ω .m para 20% de argila, e até 3700 Ω .m para solos muito secos [20]. De 4 a 11 m de profundidade, tem-se rochas intemperizadas e decompostas, oriundas da rocha que forma a camada inferior. Em regiões mais profundas encontra-se arenito, cuja faixa de resistividade elétrica está entre 25 e 400 Ω .m, de acordo com o grau de saturação da rocha.

Ao observar os imageamentos geoelétricos das linhas CD1a e CD1b, mostrados, respectivamente na Figura 5.50 e na Figura 5.51, percebe-se que, apesar de tratarem-se de linhas perpendiculares entre si, a forma das camadas e a faixa de resistividade elétrica apresentam diferenças perceptíveis. O imageamento geoelétrico da linha CD1a, mostrado na Figura 5.50, exibe basicamente duas regiões distintas, ora de alta ora de baixa resistividade elétrica. Até 5 m de profundidade e entre 20 e 25 m de comprimento da linha observa-se a região de baixa resistividade, com valores de até 15 Ω .m, o que é compatível com solo argiloso, e pode estar associado à presença de água. Nas demais áreas, a resistividade elétrica está dentro da faixa de 15 a 300 Ω .m, valores que podem abranger o arenito e as rochas intemperizadas. Porém, a interface horizontal entre esses dois tipos de litologia não fica clara no perfil elétrico da Figura 5.50; está mais evidente na Figura 5.51, conforme descrito a seguir.

O imageamento geoelétrico da linha CD1b, mostrado na Figura 5.51, exibe claramente camadas cuja resistividade elétrica aumenta com a profundidade. Até cerca de 5 metros de profundidade, os valores ficam entre 30 e 150 Ω .m, o que corresponde ao solo argiloso. De 5 a 8 m de profundidade, os valores intermediários de ρ , entre 150 e 1500 Ω .m podem indicar a presença de rochas intemperizadas e decompostas, que possuem resistividade elétrica menor que da sua rocha de origem, mais compactada. Em profundidades maiores, de 8 a 15 metros, ρ continua aumentando, chegando a cerca de 2400 Ω .m, o que corresponde à ocorrência de rocha mais compactada, como o arenito.

O imageamento elétrico da linha CD1b, mostrado na Figura 5.51, exibe maior conformidade com o perfil litológico do poço que o imageamento da linha CD1a (Figura 5.50). Fica clara em CD1b a variação vertical da resistividade elétrica, observada através de camadas estratificadas horizontalmente, com valores de ρ compatíveis com as estruturas encontradas no perfil do poço.

A diferença entre perfis de resistividade elétrica das linhas CD1a e CD1b mostra que existem direções preferenciais para a ocorrência de fraturamentos e o aparecimento de outras estruturas capazes de armazenar água.



Figura 5.50 Imageamento geoelétrico da Linha CD1a, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006306.



Figura 5.51 Imageamento geoelétrico da Linha CD1b, perpendicular à linha CD1a, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006306.

O aquífero no ponto onde foram executados os levantamentos CD1a e CD1b é do tipo granular, conforme pode ser observado na Figura 5.16, o que justifica os valores baixos de resistividade elétrica encontrados na maioria da extensão de ambos os imageamentos elétricos. Além disso, a presença de arenitos em uma matriz argilosa é típica da Formação Caturrita [32].

Um estudo sísmico [101] realizado exatamente na mesma linha de investigação que CD1b e mostrado na Figura 5.52, também é corroborado pelos dados do poço 4300021214, e apresenta conformidade com o perfil elétrico exibido na Figura 5.51.



Figura 5.52. Perfil gerado a partir da técnica de sísmica de refração, no mesmo local da linha de investigação CD1b. Adaptado de [101].

A <u>Linha CD2</u>, bem como o poço 4300006308 estão georreferenciados no mapa da Figura 5.53. O perfil construtivo do referido poço não está disponibilizado no SIAGAS, e, assim, buscou-se outro poço próximo à linha de investigação que oferecesse mais dados relevantes, que foi encontrado apenas a cerca de 13 km de distância de CD2, e está identificado pelo número 4300025037 na Figura 5.53, onde há uma indicação da sua localização.



Figura 5.53 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD2 e do poço 4300006308.

O perfil do poço 4300025037 mostra que na superfície, até 3 metros de profundidade, tem-se solo areno-argiloso, cuja resistividade elétrica varia de acordo com o teor de argila e o grau de saturação da rocha. Para solo arenoso saturado, esse valor parte de cerca de 80 Ω .m, enquanto que para solo argiloso, ρ fica entre 8 e 33 Ω .m [20]. Como o imageamento geoelétrico da linha CD2, mostrado na Figura 5.54, exibe a predominância de valores de ρ intermediários, variando entre 50 e 180 Ω .m, faixa correspondente a solo arenoso e argiloso, com diferentes teores de argila e umidade.



Figura 5.54 Imageamento geoelétrico da Linha CD2, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300025037.

De 3 a 11 metros de profundidade, foi identificada através do perfil litológico do poço uma camada de arenito siltoso. Sabendo-se que o arenito tem ρ dentro da faixa de 25 a 400 Ω .m [20, 97], enquanto ρ do siltito saturado é de cerca de 10 Ω .m [97], estima-se que que o arenito siltoso apresenta faixa de resistividade elétrica dentro dos valores do arenito e do siltito. O perfil elétrico apresenta, entre 3 e 11 metros de profundidade, valores de resistividade elétrica entre 50 a 400 Ω .m, sendo que entre aproximadamente 32 e 45 m de comprimento da linha encontram-se os valores mais altos, o que pode significar um menor grau de saturação.

Entre 11 e 14 metros de profundidade tem-se no perfil do poço a presença de seixos rolados, cuja resistividade elétrica é comparável com a da alteração de crocha, que está entre 100 e 1400 Ω .m, dependendo do grau de saturação. No perfil elétrico, essa faixa de profundidade apresenta valores de ρ que ficam entre 50 e 150 Ω .m, o que indica que a litologia encontrada possui alto grau de saturação.

A última camada alcançada no imageamento elétrico é de 14 a 17 m de profundidade, onde encontra-se mais uma vez arenito siltoso, cuja faixa de resistividade elétrica vai de 10 a 400 Ω .m. A faixa de valores encontrada no perfil elétrico está dentro desses valores, tendendo aos valores mais baixos, o que possivelmente indica maior grau de saturação da rocha.

O aquífero no ponto onde foi executado o levantamento é granular, o que está de acordo com a predominância de valores baixos de resistividade elétrica encontrados no imageamento, e com as estruturas geológicas encontradas no perfil litológico do poço, já que a Formação Santa Maria tem como uma de suas características a presença de arenitos de granulometrias variadas.

A <u>Linha CD3</u> está georreferenciada no mapa da Figura 5.55. Semelhante ao ocorrido na linha CD2, não há dados na base do SIGAS do perfil litológico do poço 4300006317. Foi considerado, então, o poço 4300006327, que fica a cerca de 500 metros da linha de investigação.



Figura 5.55 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD3 e do poço 4300006317.

O perfil litológico do poço mostra, em ordem de crescimento da profundidade, as seguintes litologias: areia siltosa, arenito siltoso, siltito, arenito fino, argilito e arenito siltoso. A resistividade elétrica desses materiais pode variar entre 10 e 400 Ω .m, o que é compatível com a faixa de resistividade elétrica encontrada em quase todo o perfil elétrico da Figura 5.56, que não passa de 400 Ω .m, com exceção da camada mais profunda do imageamento, que chega a mais de 800 Ω .m. Essa região pode estar relacionada à presença de arenito (conforme o perfil do poço) mais compactado, com saturação muito baixa. É possível também que exista, em profundidade maior que a abrangida pelo levantamento geofísico, alguma estrutura de ρ mais elevada, tal como o basalto.

Apesar de, em termos gerais, haver uma compatibilidade entre os valores de resistividade elétrica do perfil do poço e do perfil elétrico, não foi possível identificar no perfil elétrico as camadas correspondentes a cada litologia do perfil do poço, ou seja, não ficou tão clara a variação vertical de ρ .



Figura 5.56 Imageamento geoelétrico da Linha CD3, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006327.

De acordo com informações do poço 4300006317, a resistividade elétrica da água é de 33,6 Ω .m, valor presente entre cerca de 6 e 15 m de profundidade. Conforme o mapa apresentado na Figura 5.16, o aquífero no ponto onde foi realizado o levantamento é do tipo granular, o que pode ser confirmado observandose o perfil elétrico, que exibe uma predominância de valores baixos de resistividade elétrica. Além disso, a Formação Santa Maria, na qual se encontra a linha de investigação CD3, apresenta tipicamente siltitos e arenitos, que estão presentes no perfil litológico do poço e possuem valores de ρ compatíveis com o perfil elétrico. A Linha CD4 está georreferenciada no mapa da Figura 5.57, juntamente com o poço 4300006327.



Figura 5.57 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD4 e do poço 4300006327.

O poço próximo à linha CD4 é o mesmo que fica nas proximidades da linha CD3 e, portanto, apresenta o mesmo perfil litológico, com valores de resistividade elétrica variando entre 10 e 400 Ω .m.

No imageamento geoelétrico da linha CD4, mostrado na Figura 5.58, pode-se observar uma alternância entre zonas de alta e baixa resistividade, que se dá horizontalmente e não verticalmente, como ocorre no perfil do poço, tornando mais complexa a análise da conformidade entre ambos.



Figura 5.58 Imageamento geoelétrico da Linha CD4, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006327.

De 25 a 30 m, e de 45 a 55 m de comprimento da linha, tem-se as zonas de baixa eletrorresistividade, com valores de até 20 Ω .m, que começam a aparecer a partir de cerca de 8 m de profundidade. Entre 32 e 40 m e entre 52 e 56 m de comprimento estão as regiões de ρ mais elevada, que variam de 280 a 600 Ω .m, o que pode indicar a presença de arenito ou solos mais compactados. No restante do perfil, ρ é intermediária, com valores entre 30 e 180 Ω .m, o que pode representar solo arenoso/argiloso, com diferentes conteúdos de água e argila.

Conforme dados exibidos na Figura 5.16, a unidade hidroestratigráfica onde foi executado o levantamento é do tipo granular (Formação Caturrita), o que é confirmado através da observação do perfil elétrico da Figura 5.58, que apresenta predominantemente valores baixos de ρ . A Formação Caturrita é constituída tipicamente por siltitos e arenitos finos e médios, intercalados [81], que podem ser observados no perfil litológico.

A <u>Linha CD5</u>, bem como o poço 4300006321, estão georreferenciados no mapa da Figura 5.59. Uma vez que os dados litológicos do poço mencionado foram insuficientes, buscou-se na base de dados do SIAGAS outro poço (4300006306), localizado a cerca de 1,8 km de distância da linha CD5, cujo perfil litológico foi considerado na análise.



Figura 5.59 Mapa mostrando o georreferenciamento da Linha CD5 e do poço 4300006321.

O imageamento geoelétrico da linha CD5, mostrado na Figura 5.60, também exibe zonas de alta e de baixa resistividade elétrica.



Figura 5.60 Imageamento geoelétrico da Linha CD5, localizada no município de Candelária/RS, utilizando arranjo dipolo-dipolo, com dados do poço 4300006306.

Entre 12 e 30 m de comprimento da linha, tem-se baixa eletrorresistividade, cujos valores estão entre 4 e 20 Ω .m, o que pode indicar a presença de água. A mesma faixa de valores é encontrada entre 40 e 75 metros de comprimento, porém, apenas até 10 metros de profundidade. Entre 30 e 60 m de comprimento ρ é mais elevada, variando de 180 a 800 Ω .m, o que pode corresponder a uma formação arenítica e até basáltica, nas regiões mais resistivas. Nos interstícios entre essas suas zonas, há valores intermediários de ρ , entre 20 e 120 Ω .m, o que possivelmente indica solo arenoso/argiloso.

De 0 a 4 metros de profundidade, o perfil litológico do poço mostra solo argiloso, cuja resistividade elétrica varia de 8 a 33 Ω .m [20], conforme o teor de argila. O imageamento elétrico indica, para a mesma profundidade, valores compatíveis de resistividade elétrica, entre 10 e 120 Ω .m.

Entre 4 a 11 metros de profundidade tem-se, de acordo com o perfil do poço, rochas intemperizadas e decompostas (que correspondem a alterações de rochas ou conglomerados), cujo valor teórico para resistividade elétrica é de 2 x $10^3 \Omega$.m, compatível com o perfil elétrico entre 30 e 40 m de comprimento da linha CD5.

A última camada do perfil elétrico, que vai de 11 a 17 metros de profundidade do imageamento geofísico, apresenta arenito de tamanho médio. Sabe-se que a faixa de ρ para o arenito pode variar de 25 a 400 Ω .m [20, 97], de acordo com o grau de saturação da rocha. Como o imageamento geoelétrico mostra para essa profundidade valores de até 1000 Ω .m, é possível estimar que o arenito presente na área se encontra pouco saturado, ou seja, indica a ausência ou escassez de água.

O mapa da Figura 5.16 mostra que o aquífero é do tipo granular (Formação Caturrita) no ponto investigado, o que está em conformidade com o perfil litológico do poço, apesar de, em profundidades maiores, o perfil elétrico mostrar valores elevados de ρ , que poderiam indicar rocha basáltica ou estrutura semelhante. A presença de arenito numa matriz de argila é típica do Formação Caturrita [32].

A Tabela 5.10 mostra uma síntese de dados das linhas de investigação de Candelária, comparando valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço com os valores de resistividade elétrica medidos, de acordo com a variação de profundidade.

Tabela 5.10. Dados comparativos entre os valores teóricos de resistividade elétrica indicados para a litologia descrita no poço e os valores de resistividade elétrica medidos, de acordo com a variação de profundidade, considerando as linhas de investigação de Candelária.

LINHA	PERFIL	. DO POÇO		PERFIL ELÉTRICO					
	Prof. poço (m)	Descrição litológica	Valores teóricos de ρ (Ω .m)	Prof. (m)	Faixa aprox. de ρ medida (Ω.m)				
CD1a	0 – 4	solo argiloso	8 – 33	0 – 5	2 – 15				
	4 – 11	rochas intemperizadas e decompostas	2,0 x 10 ³	6 – 15	2 – 15 pra L=20-25m 15 – 300 pras demais áreas				
	11 – 15	arenito médio	100 – 400						
CD1b	0-4	solo argiloso	8 – 33	0 – 4	50 – 150				
	4 – 11	rochas intemperizadas e decompostas	2,0 x 10 ³	4 – 11	150 – 1500				
	11 – 15	arenito médio	100 – 400	11 – 15	1500 – 2400				
CD2	0 – 3	solo areno- argiloso	8 - 33 145 (solo aren. sat.)	0 – 3	50 – 180				
	3 – 11	arenito siltoso	25 – 400 (arenito) 10 (siltito)	3 – 11	50 – 400				
	11 – 14	seixos rolados	100 – 1400 (cascalho)	11 – 14	50 – 150				
	14 – 17	arenito siltoso	25 – 400 (arenito) 10 (siltito)	14 – 17	30 – 150				
	0 – 0,5	areia siltosa			10 – 150				
	0,5 – 2,5	arenito siltoso	25 – 400 (arenito) 10 (siltito)	0 – 11,5					
	2,5 – 7,5	siltito	10	,					
CD3	7,5 – 11,5	arenito fino	100 – 400						
020	11,5 – 16,5	argilito	Tendem a aumentar em relação ao solo argiloso	11,5 – 17	10 – 600				
	16,5 – 17	arenito siltoso	25 – 400 (arenito) 10 (siltito)						
	0-0,5	areia siltosa							
CD4	0,5 – 2,5	arenito siltoso	25 – 400 (arenito) 10 (siltito)						
	2,5 – 7,5	siltito	10	Variação					
	7,5 – 11,5	arenito fino	100 – 400 Tondom a sumentar	temente	5 – 500				
	11,5 – 16,5	argilito	em relação ao solo argiloso	horizontal					
	16,5 – 17	arenito siltoso	25 – 400 (arenito) 10 (siltito)						
CD5	0-4	solo argiloso	8 (40% de argila) - 33 (20% de argila)	0 - 4	10 – 120				
	4 – 11	rochas intemperizadas e decompostas	< 400	4 – 11	10 – 300				
	11 – 17	arenito médio	100 – 400	11 – 17	3 – 1000				

5.5. Conformidade entre o perfil elétrico e dados litológicos dos poços

As linhas de investigação obtidas a partir de dados de eletrorresistividade foram avaliadas e classificadas considerando-se a sua conformidade com os perfis litológicos obtidos de dados de poços. As linhas foram então distribuídas entre 3 grupos: as que possuem "conformidade elevada", "conformidade razoável" e "análise limitada", conforme os critérios descritos na Tabela 5.11.

Tabela 5.11. Grupos nos quais foram distribuídas as linhas de investigação, de acordo com a conformidade dos perfis elétricos com os perfis litológicos.

Conformidade elevada	O perfil elétrico apresenta, em todas as camadas e em toda a extensão da linha de investigação, resistividade elétrica correspondente aos materiais geológicos encontrados no perfil litológico do poço
Conformidade razoável	O perfil elétrico apresenta, em algumas camadas e/ou em partes da extensão da linha de investigação, resistividade elétrica correspondente aos materiais geológicos encontrados no perfil litológico do poço
Análise limitada	A comparação entre o perfil elétrico e o perfil litológico do poço é limitada, pois o primeiro apresentou variações predominantemente horizontais de resistividade elétrica, e o segundo apresenta sempre as camadas verticais

Das 21 linhas de investigação, 12 mostraram "conformidade elevada" com o perfil litológico do poço localizado nas proximidades, ou seja, as litologias encontradas através das duas técnicas diferentes apresentaram resultados semelhantes. São elas: SC1, SC3, QC1, QC2, QC4, QC5, AL3, AL4, AL5a, AL5b, CD1b e CD5. Um grau de "conformidade razoável" foi identificado em 5 linhas de investigação. São elas: SC2, QC3, AL1, AL6 e CD1a. As demais linhas apresentaram uma "análise limitada", conforme será descrito em seguida.

Na linha SC2 observou-se, no sentido vertical, uma diferença entre o perfil elétrico e o perfil litológico. De acordo com dados do perfil do poço, ocorre uma interface entre solo argiloso e argilito em 4 m de profundidade. Entretando, uma interface plausível para essa configuração apareceu somente em 14 m de profundidade do imageamento elétrico.

O perfil elétrico da linha QC3 mostra uma região de alto resistivo que não é identificada pelo perfil do poço. Isso acontece porque as variações de materiais geológicos em subsuperfície ocorrem mesmo numa pequena variação espacial. A conformidade da linha é considerada razoável porque, nas regiões de baixo resistivo, é compatível com o perfil do poço.

O imageamento geoelétrico da linha AL1 apresenta, numa primeira análise, total concordância com o perfil do poço, pois apresentam, respectivamente, um valor alto de resistividade elétrica e uma formação basáltica em toda a profundidade alcançada. Entretanto, a homogeneidade do perfil elétrico, incomum para o método, indica que houve erro na medida.

O perfil litológico do poço próximo à Linha AL6 mostra basalto a partir de 1 m de profundidade. O imageamento elétrico de AL6 apresenta valores de resistividade elétrica compatíveis com o basalto especialmente entre 30 a 45 metros de comprimento. Nas demais áreas, os valores de ρ são menores e por isso o perfil elétrico e litológico apresentaram uma conformidade razoável.

A linha CD1a apresenta, de cerca de 25 a 40 m de comprimento, litologias compatíveis com o perfil do poço, porém apresenta variações horizontais que se podem indicar uma fratura. A linha CD1a, perpendicular à CD1b apresenta uma conformidade maior com o perfil do poço.

Restaram 4 linhas de investigação, cuja comparação com o perfil litológico do poço encontra limitações. São elas: AL2, CD2, CD3 e CD4. As limitações ocorrem porque um perfil litológico fornece informações da variação vertical dos materiais litológicos, em um determinado ponto. Já as imagens do perfil elétrico das referidas

linhas apresentaram variações predominantemente horizontais. Isso não significa necessariamente que não há conformidade entre o perfil do poço e o perfil elétrico, mas que a comparação entre ambos se torna mais complexa. Uma síntese dos resultados dessa análise pode ser vista na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Avaliação da conformidade entre perfis geofísicos e os perfis litológicos de poços. A ordem de apresentação dos dados respeita a ordem crescente da DLP.

Linha de investigação	SC2	SC1	4L1	AL2	QC1	CD4	CD1a	CD1b	QC4	QC3	9T6	AL4	CD3	AL3	QC5	AL5a	AL5b	CD5	SC3	QC2	CD2	
DLP (m)	2	3	3	7	8	32	60	60	80	160	280	400	400	750	1200	1500	1500	1800	2400	2500	13000	
															conformidade elevada							

conformidade elevada conformidade razoável análise limitada

Cabe ressaltar que, na Tabela 5.12, os dados são apresentados respeitando a ordem crescente da distância entre a linha de investigação e o poço do qual foi extraído o perfil litológico (DLP). Percebe-se que mesmo para distâncias grandes entre a linha e o poço, a conformidade pode ser elevada e uma conformidade razoável foi verificada em linhas de investigação com DLPs menores, variando de 2 a 280 m. Sabe-se que uma variação na geologia em subsuperfície é possível mesmo para um pequeno deslocamento espacial, ao mesmo tempo que uma mesma geologia também pode ser mantida em grandes extensões, o que demonstra que o critério da DLP envolve relações de difícil compreensão.

De acordo com os mapas hidrogeológicos (Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 encontrados), algumas linhas de investigação encontram-se na borda entre duas unidades hidroestratigráficas diferentes ou entre uma unidade hidroestratigráfica e o Sistema Aquífero Serra Geral. São elas: linhas SC3, QC1, QC5, AL5, CD3, CD4. Assim, por uma limitação de escala, existe a possibilidade

das referidas linhas estarem dentro de uma unidade diversa daquela estabelecida na Tabela 5.5.

Especial atenção deve ser dada às linhas SC3 (Figura 5.23), QC5 (Figura 5.33) e AL5 (Figura 5.45 e Figura 5.46), que ao invés de pertencerem ao Sistema aquífero Serra Geral, que é um aquífero fraturado, podem estar dentro da Formação Botucatu, de natureza granular, que se estende abaixo dos derrames da Serra Geral e caracteriza-se por apresentar arenitos finos e médios, além de poros com alta conexão que oferecem potencial para captação de água [31, 34, 35].

Considerando-se ainda que a DLP para as linhas SC3, QC5 e AL5 é de, respectivamente, 2,4, 1,2 e 1,5 km, existe a possibilidade de o levantamento geofísico e o poço estarem em formações geológicas diferentes entre si, ou ambos estarem localizados na Formação Botucatu, diferente do que foi registrado na Tabela 5.5.

Na linha SC3, isso pode explicar a presença de argilito no poço, enquanto o levantamento elétrico revelou valores de resistividade mais próximos do basalto, litologia típica do Sistema Aquífero Serra Geral. De modo análogo ao ocorrido com a linha SC3, a possibilidade de as linhas AL5a e AL5b estarem na Formação Botucatu explica os valores de resistividade elétrica baixos para a litologia do perfil do poço, que indicou a presença de basalto. Já a linha QC5, apresentou elevada conformidade entre o perfil litológico do poço e o perfil elétrico, o que indica que ambos estão dentro do Serra Geral, conforme descrito.

6. CONCLUSÕES

O eletrorresistivímetro utilizado na presente pesquisa possui algumas limitações de ordem técnica e por isso foi necessário criar mecanismos capazes de otimizar os recursos do equipamento. A obtenção de dados elétricos relativos às mudanças litológicas encontradas em ambiente subterrâneo raso no estado do Rio Grande do Sul foi possível graças ao desenvolvimento de um procedimento operacional alternativo para aquisição de dados, que diminuiu o tempo necessário em campo e culminou na construção de uma ferramenta capaz de confeccionar as tabelas de campo de forma automatizada.

Alguns obstáculos foram encontrados durante a interpretação dos dados geoelétricos adquiridos em campo. Uma delas é o fato de que há muitas litologias possíveis para uma mesma faixa de valores de resistividade elétrica, necessitandose da maior quantidade de informações possíveis para se chegar à melhor interpretação provável sobre os materiais encontrados em subsuperfície. Essas informações adicionais podem ser provenientes, por exemplo, de dados de perfis litológicos, de experimentos em campo aplicando outros métodos geofísicos como a sísmica de refração e de mapas hidrogeológicos que revelem a formação geológica do ponto estudado.

Foram obtidos 21 perfis elétricos em municípios da região central do estado do Rio Grande do Sul. Entendeu-se que 12 desses perfis apresentaram elevado grau de conformidade com o perfil litológico do poço tubular mais próximo. Em outros 5 levantamentos elétricos, a conformidade foi considerada razoável. Nas restantes 4 linhas, a análise da conformidade foi limitada, pois o perfil elétrico exibiu variações predominantemente no sentido horizontal, enquanto o perfil litológico, por definição, mostra as camadas litológicas verticalmente. O fato de algumas linhas de investigação estarem na borda entre aquíferos granulares e o Sistema Aquífero Serra Geral pode explicar inconformidades entre perfis litológicos e perfis elétricos, especialmente em linhas de investigação localizadas entre o aquífero granular e o aquífero fraturado.

Foi avaliada a relação da conformidade entre os perfis elétricos e litológicos com a distância entre a linha de investigação e o poço (DLP). Considerando-se que a geologia em subsuperfície pode variar mesmo dentro de uma pequena distância, ou pode se manter a mesma em grandes áreas, a influência da DLP na conformidade do perfil só pode ser considerada quando a linha de investigação perpassa o poço.

Para cada região ou município onde foram executados os levantamentos geofísicos, um perfil elétrico foi comparado com um perfil obtido pela técnica de sísmica de refração, cooperando para a validade dos dados de eletrorresistividade e para a correta interpretação das camadas litológicas encontradas em subsuperfície a partir do perfil elétrico.

A profundidade de investigação esteve de acordo com valores teóricos previstos. Estima-se experimentalmente que um aumento do comprimento da linha de investigação (L) não ocasiona um incremento proporcional da profundidade de investigação. Uma vez que o aumento de L aumenta drasticamente a quantidade de pontos a serem coletados e o tempo de aquisição dos dados, há um limite no qual o aumento de L é, na prática, vantajoso. Entretanto, o volume de dados empregados para essa análise, especialmente para valores L mais elevados, ainda é pequeno para conclusões definitivas.

A possibilidade de presença ou não de estruturas geológicas com potencial de armazenamento de águas subterrâneas foi identificada pelo aparecimento de possíveis fraturas/falhas e pela estimativa do grau de saturação da rocha, que é observável pela correlação entre dados de resistividade elétrica e do perfil litológico do poço. A obtenção de perfis elétricos perpendiculares entre si mostrou inclusive que existem direções preferenciais para a ocorrência de fraturamentos, uma vez que, mesmo os perfis interceptando-se entre si, mostraram diferenças nas camadas litológicas.

Diante dos resultados apresentados, é fato que a presente pesquisa direciona-se para um avanço importante nos conhecimentos necessários para se obter informações a respeito das litologias capazes de armazenar água e garantir a segurança hídrica do estado. Nesse sentido, a geofísica se coloca como componente crucial para o desempenho desse trabalho. Entretanto, cabe considerar as limitações do método e atentar à necessidade de utilizá-lo dentro de uma visão crítica, respeitando sua complexidade técnica e científica.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente de trabalho inaugura na PUCRS, juntamente com outras obras realizadas por colegas do GIGA no mesmo período, a produção de teses e trabalhos científicos na área de geofísica. Dessa maneira, uma ampla gama de trabalhos futuros pode ser planejada, de modo a dar continuidade ou complementar os estudos de águas subterrâneas no estado do Rio Grande do Sul.

Sugere-se cobrir outras regiões do estado através de um maior volume de informações, o que inclui a execução de mais levantamentos geoelétricos em campo e a correlação dos dados adquiridos com mais perfis geológicos de poços, disponíveis em abundância no SIAGAS.

Propõe-se ainda a aquisição de dados em linhas perpendiculares entre si, formando uma malha que pode oferecer um perfil elétrico da subsuperfície em três dimensões. O uso de mais arranjos de campo, além do dipolo-dipolo, também pode colaborar para o enriquecimento dos dados, e permitiria uma investigação mais completa sobre os materiais geológicos encontrados em subsuperfície.

Outra possibilidade de continuidade do presente trabalho é aperfeiçoar a ferramenta de confecção das tabelas de campo apresentada. Como complemento à ideia mencionada no parágrafo anterior, é possível inserir, por exemplo uma função de confecção automatizada de tabelas para outros arranjos de eletrodos.

Os perfis geoelétricos adquiridos são úteis para estimar a vulnerabilidade natural de aquíferos, através da identificação de camadas confinantes, e podem ser aplicados para essa finalidade no Rio Grande do Sul.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

 [1] UNESCO. United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. 2012. Disponível em:
 <unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>. Acesso em 14 fev 2017.

[2] HOEKSTRA, A. Y.; Mekonnen, M. M. The water footprint of humanity.
 Proceedings of the National Academy os Sciences of the United States os
 America, v. 109, p. 3232-3237, 2012.

[3] UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Curso de aperfeiçoamento em Gestão de Recursos Hídricos. Princípios de hidrologia ambiental. 2005. 203 p.

[4] UNESCO. International Hydrology Series. World Water Resources at the Beginning of the 21st Century. Cambridge, 2003. 25 p. Disponível em:
 http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam034/2002031201.pdf>. Acesso em:
 dezembro de 2017

 [5] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Água na medida certa: a hidrometria no Brasil. Brasília, 2012a. 72p. Disponível em:
 http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/AguaNaMedida Certa.pdf>. Acesso em: nov 2015.

[6] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil. Brasília, 2002. 68p. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2002/AEvolucaodaGe staodosRecursosHidricosnoBrasil.pdf>. Acesso em: nov 2015. [7] NEDEL, A.S; Sause, T. M.; Saito, S. M. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003 – 2009 - Parte I: Seca.
In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia: 2010, Belém.

[8] SEVERO, R. Após maior seca dos últimos 60 anos, Rio Grande do Sul tem previsão de chuva nos próximos dias. Agência Brasil, Brasília, 30 de Maio de 2012. Disponível em: ">http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2012-05-30/aposmaior-seca-dos-ultimos-60-anos-rio-grande-do-sul-tem-previsao-de-chuva-nosproximos-dias>. Acesso em: out 2015.

 [9] GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Centro Estadual de Meteorologia. Boletim Meteorológico Mensal. Disponível em:
 http://www.cemet.rs.gov.br/lista/218/Boletim_Meteorol%C3%B3gico_Mensal. Acesso em: set 2015.

[10] COSTA, A. C. Seca no RS é problema antigo, a solução também é velha conhecida. **Veja**, 12 de janeiro de 2012, Disponível em: . Acesso em: out 2015.

[11] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014. Florianópolis, 2016. 230p.

[12] CLARKE, Robin; King, Jannet. O Atlas da Água. São Paulo: Publifolha, 2005.128 p.

[13] FARIA, A. M. J. B.. Aquífero Guarani: defesa da soberania e sustentabilidade. Curitiba: Multideia, 2014. 175 p.

[14] GLEENSON, T.; et alli. The global volume and distribution of modern groundwater. **Nature Geoscience**, v. 9, p. 161-167. 2016.

[15] LEAL, A. S. As águas subterrâneas no Brasil. Ocorrências, disponibilidades e usos. O Estado das Águas no Brasil. Brasília: ANEEL, 1999.

[16] ABAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Águas subterrâneas, o que são?. Disponível em: <http://www.abas.org/educacao.php>. Acesso em: out 2015

 [17] CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS). Recursos Hídricos Subterrâneos – Levantamento de Recursos Hídricos Subterrâneos, Relatório Diagnóstico, 2012. 34 p.
 Disponível em:

http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/PDF_RIMAS/VOLUME16_Sistema_Aquifero_Guarani_RS.pdf>. Acesso em: abril de 2015.

[18] MOSEKI, M. C. Climate change impacts on groundwater: literature review. **Environmental Risk Assessment and Remediation**, v. 2, p. 16-20, 2017.

[19] SAMOËLIAN, A. et. al. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil & Tillage Research, v. 18, p. 173-193. 2005.

[20] CONSÓRCIO GUARANI. Técnicas Geofísicas Terrestres aplicáveis ao estudo do SAG e guia básico de dados regionais. Série Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. 2009. Disponível em:

http://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/aquifero-guarani-tecnicas-geofisicas-terrestres-aplicaveis-ao-estudo-do-sag-e-guia-basico-de-dados-regionais.pdf>. Acesso em: abril de 2015.

[21] BRAGA, A. C. O. Geofísica aplicada. Módulo: Métodos Geoelétricos nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2007. 80 p. [22] FURLAN, M. Avaliação da utilização de ensaios geoelétricos 2D para estudos arqueológicos em locais controlados. São Paulo. 2008. 140p. Dissertação (Mestrado em Ciências – área de concentração Geofísica). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG, Universidade Federal de São Paulo, Brasil.

[23] BRAGA, A. C. O. Métodos geolétricos aplicados. Módulo: Hidrogeologia.Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 91 p.

[24] BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Ciclo Hidrológico**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclohidrologico?tmpl=component&print=1>. Acesso em: Agosto de 2018.

[25] REBOUÇAS, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. **Águas doces no Brasil: Capital** ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras Editora, 2006, 732 p.

[26] BORGHETTI, N. R. B.; Borghetti, J. R.; Rosa Filho, E. F. Aquífero Guarani: A Verdadeira Integração Dos Países do Mercosul. Curitiba: Off Set, 2004. 214 p.

[27] GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Instituto Geológico. As águas subterrâneas do estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental 1.
São Paulo, 2009. 104 P. Disponível em:
http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/cart_AG_SB.pdf
Maio de 2018.

[28] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília, 2005. 134p. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDeman da.pdf>. Acesso em: nov 2015.

[29] GONÇALES, V. G.; Giampá, C. E. Q. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo: Signus, 2006. 502 p.

[30] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos Recursos
 Hídricos no Brasil: informe 2014. Brasília, 2014. 105p. Disponível em:
 http://conjuntura.ana.gov.br/docs/conj2014_inf.pdf>. Acesso em: nov 2015.

[31] OLIVEIRA, L. A.; Vieira, A. S. Estado da arte do Sistema Aquífero Guarani – SAG. **Caminhos de Geografia**. v. 11, p. 174 – 189. 2010.

[32] MACHADO, J. L. F. 2005 Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. São Leopoldo. 2005. 237 p. Tese (Doutorado). Unisinos, Brasil.

 [33] MACHADO, J. L. F. Sistema Aquífero Guarani e seu uso em irrigação no Rio Grande do Sul e porção sudoeste de Santa Catarina. XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste. 2007. Disponível em:

<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22161/14517>. Acesso em: ago 2018.

[34] HAUSMAN, A. 1995. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul.** Acta Geologica Leopoldensia. Editora Univ. 1995. p. 127.

[35] CONSÓRCIO GUARANI. Síntese Hidrogeológica do SAG. Série Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. 2009. Disponível em: http://www.deltasur.org/5_sintese.pdf. Acesso em: abril de 2015.

[36] SCHERER, C. M. S.; Lavina, E. L. C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian – fluvial strata of the Upper Jurassic Guara Formation, southern Brazil. **Sedimentology**. V. 52, p. 1323-1341. 2005.

[37] HALLIDAY, D.; Resnick, R.; Walker, J. **Fundamentos de Física 3 – Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 408 p. [38] GANDOLFO, O. C. B. Um estudo do imageamento geolétrico na

investigação rasa. São Paulo. 2007. 214p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brasil.

[39] FACHIN, S. J. Ensaios geoelétricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema. São Paulo. 2007. 142p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, Brasil.

[40] ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corrente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972. 523 p.

[41] KEAREY, P. BROOKS, M., HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3a. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2002. 272p.

[42] MEDEIROS, W. E.; LIMA, O. A. L. Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços. Brazilian
 Journal of Geophysics, v. 17, p. 103-116. 1999.

[43] HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. **American Journal of Physics**, v. 69 (9), p. 943-952. 2001.

[44] TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied Geophysics. 2^a.Ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1990. 770 p.

[45] MOLLER, I.; SORENSEN, K. I.; AUKEN, E. Geoelectrical methods. Burval

[46] LOKE, M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Geotomo Software. 1999. 67 p.

[47] ELIS, V. R. et. al. O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e depósitos de resíduos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p. 317-325, 2008.

[48] ELIS, V. R.; Barroso, C. M. R. e Kiang, C. H. Aplicação de ensaios de resistividade elétrica na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras / Marituba em Maceió – AL. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22(2), p. 101-113, 2004.

[49] MADRUCCI, V.; Taioli, F. e Araújo, C. C. Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo do aquífero fraturado, Lindóia – SP. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23(4), p. 437-451, 2005.

[50] GALLAS, J. D. F e Giardin, A. Eletrorresistividade da prospecção de aquíferos fraturados. **Águas Subterrâneas**, v. 30(1), p. 119-138, 2016.

[51] CARRIÈRE, S. D. et alli. Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. **Journal of Applied Geophysics**, v. 94, p. 31–41, 2013.

[52] PARK, S. et. al. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled land fi II, South Korea. Journal of Applied Geophysics. V. 135, p. 1-7. 2016.

[53] ZHOU, W.; Beck, B. F.; Stephenson, J. B. Reliability of dipole–dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terraines. **Environmental Geology**. V. 39, p. 760–766. 2000.

[54] GALLAS, J. D. F. Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Rio Claro. 2000. 174 p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Brasil.

[55] SCHWARTZ, B. F.; Schreiber, M. E.; Yan, T. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. **Journal of Hydrology**. V. 362, p. 234–246. 2008.

[56] EVJEN, H. M. Depth factor and resolving power of electrical measurements: **Geophysics**, v. 3, p.78-95, 1938.

[57] ROY, A.; APPARAO, A. Depth of investigation in direct current methods. **Geophysics**, v. 36, p. 943-959, 1971.

[58] EDWARDS, L. S.. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. **Geophysics**, p. 1020-1036, 1977.

[59] BARKER, R. D. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. **Geophysics**, v. 54, p. 1031-1037, 1989.

[60] HEWAIDY, A. G. A. et AL. Groundwater exploration using resistivity and magnetic data at the northwestern part of the Gulf of Suez, Egypt. **Egyptian Journal** of Petroleum, v. 24, p. 255–263. 2015.

[61] OLIVA, A. et al. Utilização do método da eletrorresistividade na caracterização hidrogeológica de área de recarga do Sistama Aquífero Guarani. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23193/15304>. Acesso em: mar 2017.

[62] LIMA, O. A. et al. Estruturas geoelétrica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da Bacia do Alto Curacá, semi-árido da Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28 (3), p. 445-461. 2010.

[63] MORAIS, F.; BACELLAR, L. A. P. Geofísica Aplicada ao Estudo de Fluxos da Água no Solo. **Sociedade & Natureza**, v. 22 (1), p. 213-222. 2010.

[64] PEREIRA, G. C. P.; Morais, F. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. **Revista Geonorte**, v. 2, p.1475-1483. 2012.

[65] LOPES, R. O.; Silva, A. B. H.; Carneiro, P. J. R. Estudo de caso: o uso do método geofísico para locação de poços tubulares em Rorainópolis – RR. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23467/15554>. Acesso em: set 2018

[66] OLIVEIRA, E. B. O.; Andrade, R. L. R.; Soares, J. A. Aplicação do método geofísico da eletrorresistividade para locação de poços de água no sertão da Paraíba. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004. Disponível em: http://www.editorarealize.com.br/revistas/conidis/trabalhos/TRABALHO_EV074_MD 4_SA5_ID628_02102017235226.pdf>. Acesso em: ago 2018

[67] CARMELO, A. C. et al. Integração de informações geológicas e geofísicas para estudos de aquíferos fraturados. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2008. Disponível em:

<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23735/15806>. Acesso em: jun 2018

[68] SILVA, A. C.; DOURADO, J. C.; MOREIRA, C. A.. Aplicação da eletrorresistividade na caracterização do meio hidrogeológico na cidade de Ji-Paraná (RO). **Geociências**, v. 30, p. 641-650. 2011.

[69] BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, p. 367-374. 2010.

[70] SILVA, R. W. C. Emprego do método da eletrorresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério minicipal de Vila Rezende – Piracicaba – SP. Revista Brasileira de Geofísica, v. 27 (3), p. 389-399. 2009. [71] BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C.. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24(4), p. 573-581. 2006.

[72] SRINIVASAMOORTHY, K. et AL. Electrical imaging techniques for groundwater pollution studies: a case study from Tamil Nadu State, South India. **Earth Science Research Journal**, v. 13, p. 30-39. 2009.

[73] CARROLL, S. A. Key factors for determining groundwater impacts due to leakage from geologic carbon sequestration reservoirs. International Journal of Greenhouse Gas Control, p. 153-168. 2014.

[74] AMARANTE, W. M. S.; Lima, O. A. L.; Cavalcanti, S. S. Electrical resistivity meyhod applied to study water contamination around the Alagoinhas Cemitery, Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**. V. 33, p. 489-501. 2015.

[75] SANTOS, R. B. A. Tomografia elétrica aplicada na investigação de fluxo de lixiviado em meio fraturado em um lixão no município de Lavras do Sul (RS).
Rio Claro. 2018. 94p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Brasil.

[76] SILVA, M. A. Prospecção geofísica em ocorrência de Estanho associada ao Granito São Sepé (RS). Rio Claro. 2018. 55p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Brasil.

[77] MOREIA, C. A.; ILHA, L. M. Prospecção geofísica em ocorrência de cobre localizada na bacia sedimentar do Camaquã (RS). Revista Escola de Minas, v. 64
(3), p. 305-311. 2011.

[78] MOREIRA, C. A. et al.. Análise das relações entre parâmetros geoelétricos e vazões para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS). Águas Subterrâneas, v. 27 (3), p. 45-59. 2013.

[79] GOFFERMANN, M.; VIERO, A. P.; SILVA, E. B. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS. **Pesquisas em Geociências**, v. 42 (3), p. 239-261. 2015.

[80] VIEIRA, J. S.; DI GIORGIO, D.; LENGLER, H. Um caso de sucesso de pesquisa de água subterrânea, com o método elétrico de resistividade. XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços / I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste. 2007. Disponível em:

<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22198/14550>. Acesso em: mai 2016.

[81] CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>. Acesso em: set 2015.

[82] CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS). Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>. Acesso em: set 2015.

[83] HAMDAM, H. e Vafidis, A. Inversion techniques to improve the resistivity images over karstic structures. In: **Near Surface**. 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Dublin, 2009.

[84] WISÉN, R.; Auken, E. e Dahlin, T. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from Boreholes. **Near Surface Geophysics**, p. 71-79, 2005.

[85] GEOMOTOMO SOFTWARE. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Disponível em: https://www.geotomosoft.com/downloads.php>. Acesso em: set 2015.

[86] MUCHINGAMI, I. et alli. Electrical resistivity survey for groundwater investigations and shallow subsurface evaluation of the basaltic-greenstone

formation of the urban Bulawayo Aquifer. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 50, p. 44-51, 2012.

[87] METWALY, M. e AlFouzan, F. Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia. Geoscience Frontiers, v. 4, p. 469-476, 2013.

[88] AFSHAR, A. et alli. Geophysical investigation of underground water content zones using electrical resistivity tomography and ground penetrating radar: A case study in Hesarak-Karaj, Iran. **Engineering Geology**, v. 196, p. 183-193, 2015.

[89] OLAYINKA, A.I. e YARAMANIC, U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. **Journal of Applied Geophysics**, v. 45, p. 63–81, 2000.

[90] TSOURLOS, P.I.; Szymanski, J. E. e Tsokas, G. N. A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data. **Journal of the Balkan Geophysical Society,** v. 1 (1), p. 3-13, 1998.

[91] LOKE, M. H.; Dahlin, T. e Rucker, D. F. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys. **Near Surface Geophysics**, v. 12, p. 5-24, 2014.

[92] GOLDEN SOFTWARE. A basic undersitanding of Surfer gridding methods. Disponível em: <https://support.goldensoftware.com/hc/en-us/articles/231348728-A-Basic-Understanding-of-Surfer-Gridding-Methods-Part-1>. Acesso em: dez 2018.

[93] DAHLIN, Torleif. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. **First Break**, v. 14, p. 275-283. 1996.

[94] INCRA - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. Levantamento e Avaliação de Recursos Naturais, sócio-econômicos e institucionais do Rio Grande do Sul. V. 1, p. 174. 1973. [95] STRUCKMEIER, W. F.; Margat, J.. Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend. Hannover: Heise, 1995. 193 p. Disponível em: <https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Ihme1500/ standard_legend_hydro_maps.pdf?__blob=publicationFile&v=2>. Acesso em: nov 2018.

[96] CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial.Mapa Hidrogeológico no Brasil ao Milionésimo – Nota Técnica, 2014. 48p

[97] BORGES, W. R. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. São Paulo. 2007. 260p. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, Brasil.

[98] PORSANI, J. L. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geolóogico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Rio Claro. 1999. 145 p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Brasil.

[99] PRADO, R. L. A sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: Um estudo na cidade de São Paulo – SP, Brasil. Rio Claro. 2000. 174 p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Brasil.

[100] FERNANDES, C. E. Fundamentos de Prospecção Geofísica. Rio de Janeiro: Ed. Interciência. 1984. 190 p.

[101] PIRES, J. C. G.. Desenvolvimento de um método para determinar o grau de vulnerabilidade local de aquíferos subterrâneos livres usando sísmica de refração. Porto Alegre. 2019. 170p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil. [102] ARDITO, J. C. O Uso do Método de Análise de Ondas Superficiais Empregando Fontes Passivas e Ativas. São Paulo. 2013. 112 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, Brasil.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul Pró-Reitoria de Graduação Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar Porto Alegre - RS - Brasil Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564 E-mail: prograd@pucrs.br Site: www.pucrs.br